

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»



На правах рукописи

**ПОДАШЕВ ДМИТРИЙ БОРИСОВИЧ**

**Развитие научных основ технологии финишной  
обработки деталей из алюминиевых и титановых сплавов  
полимерно-абразивными инструментами**

Специальность: 05.02.08 – Технология машиностроения

диссертация  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант:  
доктор технических наук,  
профессор Ю.В. Димов

Иркутск - 2019

## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>7</b>
<b>1 Анализ состояния вопроса в области теоретических и экспериментальных исследований процесса финишной обработки деталей. Постановка задачи исследования .....</b>	<b>20</b>
<b>1.1 Краткая характеристика основных видов абразивной обработки .....</b>	<b>21</b>
<b>1.2 Технологии финишной обработки полимерно-абразивными инструментами.....</b>	<b>23</b>
1.2.1 Теоретические основы взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью.....	24
1.2.2 Физико-механические свойства поверхностного слоя детали при резании абразивными зёрнами .....	31
1.2.3 Производительность процесса обработки.....	35
1.2.4 Качество обработанной поверхности .....	37
1.2.5 Температура при контактном взаимодействии абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью.....	42
<b>1.3 Инструментальное и станочное обеспечение финишной обработки деталей .....</b>	<b>43</b>
1.3.1 Специальное оборудование для обработки полимерно-абразивными инструментами .....	43
1.3.2 Эластичные полимерно-абразивные круги .....	45
1.3.3 Полимерно-абразивные щетки .....	46
<b>Результаты и выводы по главе 1 .....</b>	<b>48</b>
<b>2 Методологические основы исследований финишной обработки деталей машин полимерно-абразивными инструментами.....</b>	<b>53</b>
<b>2.1 Система оптимального управления проектированием операций финишной обработки и ее анализ .....</b>	<b>53</b>
2.1.1 Система оптимального управления проектированием операций финишной обработки.....	56
2.1.2 Алгоритм проектирования технологической операции.....	62
2.1.3 Оценка качества выходных параметров обработки .....	65
2.1.4 Причинно-следственные взаимосвязи в системе управления финишной обработкой.....	67
<b>2.2 Инструментальное обеспечение процесса финишной обработки, выбранное для проведения комплекса экспериментальных исследований .....</b>	<b>70</b>
2.2.1 Эластичные полимерно-абразивные круги компании ЗМ.....	70
2.2.2 Полимерно-абразивные щетки компании ЗМ.....	72
<b>2.3 Обрабатываемые материалы, образцы и металлорежущее оборудование, использованное для проведения исследований в области финишной обработки .....</b>	<b>73</b>
2.3.1 Обрабатываемые материалы.....	73
2.3.2 Образцы, изготовленные для проведения исследований.....	74

2.3.3	Металлорежущее оборудование для проведения исследований .....	76
<b>2.4</b>	<b>Измерительные средства, использованные в процессе проведения экспериментальных исследований .....</b>	<b>77</b>
2.4.1	Исследования производительности процесса обработки .....	77
2.4.2	Исследования микрогеометрии поверхностей.....	78
2.4.3	Исследование сил резания.....	79
2.4.4	Исследование температуры в зоне контакта полимерно-абразивного инструмента с обрабатываемой деталью.....	81
<b>2.5</b>	<b>Статистическая обработка полученных данных .....</b>	<b>81</b>
2.5.1	Рациональное планирование экспериментов .....	81
2.5.2	Оценка значимости (незначимости) влияния рассматриваемого фактора на исследуемый выходной параметр (дисперсионный анализ).....	82
2.5.3	Регрессионный анализ.....	83
	<b>Результаты и выводы по главе 2 .....</b>	<b>84</b>
<b>3</b>	<b>Основы технологии зачистки поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами.....</b>	<b>86</b>
<b>3.1</b>	<b>Исследование характеристик эластичных полимерно-абразивных кругов и разработка теоретических положений взаимодействия режущего микрорельефа с обрабатываемой поверхностью .....</b>	<b>86</b>
3.1.1	Жесткость эластичных полимерно-абразивных кругов.....	87
3.1.2	Модуль упругости первого рода и коэффициент Пуассона .....	91
3.1.3	Микрорельеф режущей поверхности эластичных полимерно-абразивных кругов .....	92
3.1.4	Внедрение зерен круга в обрабатываемый материал.....	93
3.1.5	Количество зерен эластичного полимерно-абразивного круга, находящихся в контакте .....	97
3.1.6	Радиус кривизны вершин выступов.....	97
3.1.7	Эквивалентная поверхность .....	98
3.1.8	Экспериментальное исследование микрорельефа режущей поверхности эластичных полимерно-абразивных кругов.....	98
<b>3.2</b>	<b>Математическое моделирование силового взаимодействия эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью .....</b>	<b>100</b>
3.2.1	Теоретические положения силового взаимодействия эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью .....	100
3.2.2	Экспериментальное исследование сил резания при обработке плоских поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами.....	107
<b>3.3</b>	<b>Производительность процесса зачистки плоскостей эластичными полимерно-абразивными кругами.....</b>	<b>112</b>

3.3.1	Разработка теоретических положений для определения съёма материала при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами .....	112
3.3.2	Расчет съёма материала по разработанной теоретической математической модели ...	117
3.3.3	Экспериментальные исследования съёма материала .....	119
<b>3.4</b>	<b>Шероховатость обработанной поверхности.....</b>	<b>123</b>
<b>3.5</b>	<b>Математическое моделирование температуры в зоне контакта при обработке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами .....</b>	<b>131</b>
3.5.1	Теоретическое исследование температуры в зоне контакта эластичного полимерно-абразивного круга и обрабатываемой поверхности.....	131
3.5.2	Экспериментальное исследование температуры в зоне контакта эластичных полимерно-абразивных кругов с обрабатываемой поверхностью .....	137
3.5.3	Результаты аналитического расчета температуры при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами и сопоставления его с экспериментальными данными.....	139
<b>3.6</b>	<b>Остаточные напряжения, возникающие в поверхностном слое деталей после обработки эластичными полимерно-абразивными кругами .....</b>	<b>140</b>
3.6.1	Математическое описание напряженного состояния детали под действием силы резания .....	141
3.6.2	Температурные деформации и напряжения в поверхностном слое .....	145
3.6.3	Фиктивная сила от воздействия температуры .....	146
3.6.4	Суммарные остаточные напряжения от силового и температурного факторов.....	146
3.6.5	Экспериментальное исследование остаточных напряжений .....	147
<b>3.7</b>	<b>Анализ состояния поверхностного слоя деталей после обработки эластичными полимерно-абразивными кругами.....</b>	<b>152</b>
<b>3.8</b>	<b>Износостойкость инструмента.....</b>	<b>155</b>
3.8.1	Экспериментальное исследование износа эластичных полимерно-абразивных кругов .....	155
	<b>Результаты и выводы по главе 3 .....</b>	<b>160</b>
<b>4</b>	<b>Технологическое обеспечение качества поверхности при скругления острых кромок радиальными полимерно-абразивными щетками и эластичными полимерно-абразивными кругами.....</b>	<b>162</b>
<b>4.1</b>	<b>Обработка острых кромок полимерно-абразивными радиальными щетками.....</b>	<b>162</b>
4.1.1	Исследование характеристик полимерно-абразивных щеток .....	162
4.1.2	Исследование сил, действующих на кромку детали при обработке полимерно-абразивными щетками .....	164
4.1.3	Производительность процесса обработки кромок полимерно-абразивными щетками .....	170
4.1.4	Качество поверхности при скруглении кромок полимерно-абразивными щетками ....	180



4.1.5	Обработка кромок на наклонных поверхностях.....	187
4.1.6	Износ радиальных полимерно-абразивных щеток при обработке кромок .....	196
<b>4.2</b>	<b>Обработка острых кромок эластичными полимерно-абразивными кругами .....</b>	<b>201</b>
4.2.1	Экспериментальное исследование качества скругления кромок при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами.....	201
4.2.2	Экспериментальное исследование производительности процесса скругления кромок при помощи эластичных полимерно-абразивных кругов .....	207
4.2.3	Шероховатость поверхности скругленных кромок.....	210
	<b>Результаты и выводы по главе 4 .....</b>	<b>212</b>
<b>5</b>	<b>Исследование технологических процессов зачистки поверхностей и скругления острых кромок торцевыми полимерно-абразивными щетками.....</b>	<b>215</b>
<b>5.1</b>	<b>Обработка кромок торцевыми полимерно-абразивными щетками.....</b>	<b>215</b>
5.1.1	Параметры исследованных щеток.....	215
5.1.2	Теоретические положения силового взаимодействия ворсин торцевых полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой кромкой и их экспериментальное подтверждение.....	217
5.1.3	Производительность процесса обработки при скруглении кромок торцевыми полимерно-абразивными щетками .....	230
5.1.4	Качество обработанной кромки .....	238
5.1.5	Температура в зоне обработки .....	239
5.1.6	Износ ворсин торцевых щеток при обработке кромок .....	242
<b>5.2</b>	<b>Обработка плоских поверхностей торцевыми полимерно-абразивными щетками .....</b>	<b>245</b>
5.2.1	Теоретические положения силового взаимодействия ворсин торцевых полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой плоскостью .....	245
5.2.2	Производительность и качество обработки плоскостей торцевыми полимерно-абразивными щетками .....	255
5.2.3	Математическое моделирование температуры в зоне контакта торцевой полимерно-абразивной щетки с обрабатываемой плоскостью.....	263
5.2.4	Износ ворсин торцевой щетки при обработке поверхностей.....	269
	<b>Результаты и выводы по главе 5 .....</b>	<b>270</b>
<b>6</b>	<b>Механизация и автоматизация финишной обработки деталей с применением полимерно-абразивного инструмента .....</b>	<b>272</b>
<b>6.1</b>	<b>Технология роботизированной обработки кромок на авиационных деталях .....</b>	<b>273</b>
6.1.1	Полимерно-абразивные инструменты, применяемые на РТК.....	273
6.1.2	Производительность и качество при обработке кромок с применением РТК.....	276
6.1.3	Шероховатость и отклонение месторасположения обработанной кромки.....	283

6.1.4 Технология обработки кромок при сочетании различных поверхностей.....	284
<b>6.2 Установка для обработки кромок на длинномерных деталях</b>	
типа профилей .....	288
6.2.1 Устройство установки для обработки кромок .....	289
Результаты и выводы по главе 6 .....	296
<b>7 Управление производительностью процесса и качеством изделий при</b>	
<b>финишной обработке деталей полимерно-абразивными</b>	
<b>инструментами и технологические рекомендации .....</b>	<b>297</b>
7.1 Алгоритм проектирования технологической операции финишной обработки	
полимерно-абразивными инструментами.....	297
7.2 Управляющая подсистема «Оптимизация процесса зачистки поверхностей	
полимерно-абразивными инструментами».....	305
7.3 Программа оптимизации процесса зачистки поверхностей эластичными	
полимерно-абразивными кругами.....	309
7.4 Реализация полученных результатов при зачистке поверхностей деталей.....	311
7.5 Управляющая подсистема «Оптимизации процесса скругления острых кромок»....	314
7.6 Программа оптимизации процесса скругления острых кромок .....	317
7.7 Реализация полученных результатов при скруглении кромок	
деталей полимерно-абразивными инструментами .....	319
7.8 Расчет экономической эффективности от внедрения разработанных	
технологий в условиях авиационного производства .....	321
Результаты и выводы по главе 7 .....	322
<b>Заключение.....</b>	<b>323</b>
<b>Словарь основных условных обозначений.....</b>	<b>327</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>333</b>
<b>Приложения.....</b>	<b>357</b>
Приложение А – Обработка поверхностей полимерно-абразивными инструментами....	358
Приложение Б – Обработка кромок полимерно-абразивными инструментами.....	385
Приложение В – Обработка поверхностей и кромок торцевыми полимерно-	
абразивными щетками.....	393
Приложение Г – Оптимизация процессов зачистки поверхностей и скругления	
кромки полимерно-абразивными инструментами .....	405
Приложение Д (справочное) – Информация об использованных инструментах	
и оборудовании .....	412
Приложение Е – Результаты интеллектуальной деятельности.....	420
Приложение Ж – Акты внедрения основных результатов диссертационной работы и	
обоснования экономической эффективности полученных результатов.....	427

## Введение

На сегодняшний день отечественные автомобилестроительные, авиастроительные и другие машиностроительные предприятия активно приобретают и внедряют в производственный процесс современные, высокоэффективные станки с ЧПУ, робототехнические комплексы и другое современное оборудование. Однако при этом финишные операции такие как зачистка поверхностей, скругление острых кромок, подготовка поверхностей под лакокрасочные и гальванические покрытия, удаление дефектного слоя, удаление заусенцев и т. п. часто продолжают выполняться при помощи низкопроизводительного и неквалифицированного ручного труда, а, следовательно, повышается себестоимость изделий и снижается их качество.

В авиастроении проблема замены ручного труда на механизированный и автоматизированный стоит достаточно остро и возникает, например, в следующих случаях: при изготовлении сложных, крупногабаритных, оребренных деталей каркаса самолета, после фрезерования на станках с ЧПУ могут проявляться дефекты (в переходах с одной поверхности на другую могут быть признаки волнистости; при обработке криволинейных поверхностей в двухмерном и трехмерном пространстве могут быть погрешности по форме в связи с тем, что даже при угловом шаге  $1,8^\circ$  шагового двигателя, линейный шаг может оказаться существенно больше требуемой шероховатости; случайные дефекты, связанные с фактическим состоянием фрезы и т.д.); при изготовлении длинномерных деталей типа профилей, после фрезерования, в обязательном порядке требуется скругление острых кромок. Все перечисленные дефекты требуют дополнительной обработки (отделочно-зачистные, финишные операции), которая в реальных условиях, как правило, выполняется вручную, на что тратится существенная трудоемкость, что, как следствие, приводит к повышению себестоимости продукции и снижению ее качества.

Имеется информация о том, что на Иркутском авиационном заводе – филиале ПАО «Научно-производственная корпорация «Иркут», при производстве среднемагистрального узкофюзеляжного пассажирского самолета МС–21, имеется более 500 наименований деталей, на которых необходимы финишные операции, трудоемкость которых при ручном слесарном выполнении может достигать 65% от общей трудоемкости изготовления детали после фрезерования.

Аналогичные случаи отмечаются и в других отраслях машиностроительного производства. Кроме того, и в других отраслях инженерной деятельности, доля трудоемкости ручных слесарных операций остается весьма существенной.

В связи с изложенным, механизация/автоматизация финишной обработки деталей остается серьезной технологической проблемой, имеющей межотраслевое значение, которая существенно влияет на производительность труда, качество, себестоимость и конкурентоспособность изделий.

Наиболее эффективными способами решения вышеуказанных проблем остаются методы абразивной механической обработки, к которым относятся: шлифование, полирование, объемная вибрационная обработка и т.д.

Все перечисленные методы абразивной механической обработки достаточно глубоко исследованы и активно внедряются в серийное производство. В то же время, данные методы абразивной обработки, как и любые другие, обладают определенным набором ограничений в функциональных возможностях. Например, при обработке жесткими инструментами затруднительно зачищать тонкий поверхностный слой (особенно деталей из алюминиевых сплавов, широко применяемых в авиастроении) в связи с возможностью снятия определенного слоя материала и нарушения требуемой точности по размеру. При скруглении кромок жестким инструментом, с базированием детали по уже обработанным поверхностям, возникают затруднения с обеспечением требуемого размера (например  $0,5 \pm 0,2$  по ГОСТ 30893.1-2002) и точности кромки. Согласно ГОСТ 30893.1-2002, отклонение положения кромки относительно базовой поверхности может достигать  $\pm 1,5$  мм и даже  $\pm 6$  мм. При механизации/автоматизации процесса скругления кромок с применением промышленных роботов и жесткого инструмента (например, борфрез), возникают проблемы с обеспечением требуемого размера и качества кромок из-за повышенной чувствительности робототехнического комплекса к колебательным явлениям. При обработке жестким инструментом, малейшее колебание или неточность базирования приводит к браку и существенным экономическим потерям, ввиду высокой стоимости деталей из авиационных конструкционных сплавов.

Одним из перспективных и практически не исследованных направлений, способных эффективно решать указанные проблемы, является обработка вращающимися абразивными инструментами на гибкой (полимерной) связке. Кроме того, данным методом (в отличие, например, от виброабразивной обработки) можно обрабатывать без повреждения такие элементы детали как резьба, зубчатое зацепление, тонкие нежесткие части детали и т. п.

Однако эти инструменты, как и любые другие, обладают множеством особенностей, без знания которых невозможно говорить об эффективности применения их в производственных условиях. Внедрение процессов финишной обработки полимерно-абразивными инструментами неизбежно связано с необходимостью в каждом конкретном случае определять оптимальные тип (эластичные полимерно-абразивные круги, щетки), конструкцию (радиальные, торцевые) инструмента, его характеристики, условия процесса обработки и режимные параметры обработки.

Нельзя не отметить, что до настоящего времени отсутствует системный анализ абразивной обработки с применением полимерно-абразивного инструмента, не разработаны теоретические положения, описывающие взаимосвязи производительности процесса и качественных характеристик обработанных поверхностей с режимными параметрами обработки.

Все вышеперечисленные обстоятельства не позволяют создать единую методику проектирования операций финишной обработки полимерно-абразивным инструментом, сдерживают широкое внедрение рассматриваемого метода обработки в производство, не позволяют в полной мере использовать его широкие технологические возможности и не дают возможности для автоматизации/механизации рассматриваемых операций.

Таким образом, необходимо развитие нового научного направления в области абразивной обработки деталей с применением полимерно-абразивных инструментов, которое будет способствовать технологическому обеспечению качества обработанных поверхностей, а также эффективному внедрению данной разновидности обработки в производство. Для этого необходимо провести целый комплекс теоретических и экспериментальных исследований.

Необходимо отметить, что при анализе процессов финишной обработки (зачистке поверхностей и скругления кромок) приняты следующие допущения:

1. Абразивный инструмент рассматривается однородным и изотропным.
2. Исходная поверхность инструмента может быть представлена как нормальная стационарная эргодичная случайная функция, реализацией которой является профилограмма.
3. Режущий микрорельеф в процессе обработки остается неизменным.
4. Достижимая шероховатость обработанной поверхности формируется при взаимодействии режущего микрорельефа с гладкой обрабатываемой поверхностью.

**Целью работы** является разработка системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки авиационных деталей из алюминиевых и титановых сплавов полимерно-абразивными инструментами, с обеспечением требуемых показателей качества изделий при оптимальной производительности процесса обработки.

Для реализации вышеуказанной цели сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Проведение системного анализа технологической операции финишной обработки деталей полимерно-абразивными инструментами с целью выявления основных факторов, определяющих производительность процесса и качество обработки, а также выдвижения критериев оценки эффективности данной разновидности обработки;
2. Разработка теоретических положений, позволяющих проводить расчет показателей производительности процесса обработки и качества обработанной поверхности на основе математического моделирования взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью и информации о физико-механических свойствах обрабатываемого материала и характеристиках полимерно-абразивного инструмента.
3. Разработка теоретических математических моделей формирования остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое материала при обработке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами, а также проведение комплекса экспериментальных исследований, подтверждающего адекватность разработанных теоретических положений;

4. Получение совокупности эмпирических моделей, описывающих формирование скругленной кромки по форме и шероховатости в зависимости от режимных параметров обработки;
5. Решение задачи по вычислению целевой функции расхода электроэнергии, необходимой для проведения оптимизации финишной обработки деталей полимерно-абразивными инструментами, на основе разработки теоретических положений силового взаимодействия различного полимерно-абразивного инструмента с обрабатываемой плоской поверхностью и кромкой;
6. Экспериментальное исследование износостойкости различных полимерно-абразивных инструментов при зачистке поверхностей и скруглении острых кромок;
7. Разработка управляющих подсистем, обеспечивающих выбор оптимального инструмента и режимных параметров обработки, которые, в свою очередь, обеспечивают требуемое качество обработки при зачистке плоских поверхностей и скруглении острых кромок полимерно-абразивными инструментами при наибольшей производительности и наименьшей себестоимости выполнения операции.
8. Разработка программного обеспечения, позволяющего эффективно управлять процессами финишной обработки в производственных условиях: выбирать оптимальные полимерно-абразивный инструмент и режимные параметры обработки для зачистки поверхностей и скругления кромок деталей;
9. Разработка и обоснование единой методики внедрения полимерно-абразивных инструментов с целью наиболее эффективной и успешной замены низкопроизводительного ручного труда на механизированный и автоматизированный.

**Основная научная идея работы.** Оптимальное управление производительностью и обеспечение требуемого качества при финишной обработке деталей на основе математического моделирования процессов взаимодействия полимерно-абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью.

*В первой главе* приведен анализ выпускаемых в настоящее время эластичных абразивных инструментов, а также металлорежущего оборудования, на котором возможно их применение. Сделан вывод о том, что на сегодняшний день, выпуском эластичного абразивного инструмента в основном занимаются зарубежные фирмы. На основе работ Ю.Д. Абрашкевича, И.А. Биргера, М.И. Гринченко, Ю.В. Димова, С.Н. Корчака, Г.М. Мачишина, В.Ф. Макарова, В.И. Свищева, Д.Ф. Устиновича, Л.В. Худобина, П.И. Ящерицына, X. Huang, X. Wu и многих других рассмотрены вопросы микрогеометрии режущей поверхности абразивного круга, процесса резания абразивным зерном, температуры в зоне резания, производительности процесса обработки, формирования поверхностного слоя после обработки различными абразивными инструментами, скругления острых кромок, формирования остаточных напряжений в поверхностном слое деталей после механообработки, а также варианты решения задачи по эффективной обработке абразивными инструментом. По результатам обзора опубликованных работ сделан вывод, что на сегодняшний день не исследованы очень важные для теории и практики

вопросы, например: отсутствует системный анализ технологической операции финишной обработки деталей полимерно-абразивными инструментами, а также единая методика проектирования подобной технологической операции; не исследованы вопросы оптимизации выбора инструмента и назначения режимных параметров обработки; не изучены остаточные напряжения, возникающие в поверхностном слое при зачистке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами; отсутствуют теоретические положения взаимодействия ворса полимерно-абразивной щетки с обрабатываемой кромкой; не определены и не исследованы параметры качества и производительности процесса обработки при скруглении острых кромок; не исследована износостойкость полимерно-абразивных инструментов при зачистке поверхностей и скруглении кромок.

Таким образом, для решения задачи в области технологического обеспечения производительности и качества финишной обработкой деталей полимерно-абразивными инструментами, а также эффективного внедрения данной разновидности обработки в производство, необходимо провести целый комплекс теоретических и экспериментальных исследований.

Доказана актуальность работы, а также сформулированы цель и задачи исследований.

*Во второй главе* проведен системный анализ предметной области, разработана концепция системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки, состоящей из подсистем нескольких уровней, рассмотрен алгоритм функционирования системы, процессов и подпроцессов операции, проанализированы причинно-следственные взаимосвязи в рассматриваемой системе. Также рассмотрены методические основы исследований финишной обработки деталей полимерно-абразивными инструментами, выбрано инструментальное обеспечение, оборудование, и другое техническое (в том числе программное) оснащение экспериментальной части работы, обосновано применение методов математической статистики, основанных на планировании эксперимента, дисперсионном и регрессионном анализе. Спроектированы опытные образцы, предназначенные для исследования процессов финишной обработки деталей полимерно-абразивными инструментами как на легкодоступных участках деталей, так и на труднодоступных, в которых представлены возможные сочетания поверхностей, встречающихся на авиационных деталях, в том числе на длинномерных типа профилей.

*Во третьей главе* разработаны теоретические математические модели производительности процесса обработки и качества обработанной поверхности при обработке алюминиевых сплавов эластичными полимерно-абразивными кругами. Данные математические модели получены на базе изученного процесса взаимодействия эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью, для чего экспериментально исследованы и математически описаны жесткость и режущий микрорельеф эластичных полимерно-абразивных кругов, рассчитаны математические ожидания количества зерен, находящихся в контакте с обрабатываемым материалом, глубины их внедрения, теоретически и экспериментально исследованы силы, действующие на обрабатываемую поверхность. Приведены результаты эксперимен-

тальных исследований производительности процесса обработки и шероховатости обработанной поверхности, подтверждающие адекватность предложенных теоретических подходов. Также аналитически исследована температура в зоне резания, экспериментально исследованы износостойкость эластичных полимерно-абразивных кругов. Проведено математическое моделирование остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое материала, адекватность полученных математических моделей подтверждена экспериментальными исследованиями, проведенными на современном оборудовании с применением рентгенографического метода. Разработанные математические модели взаимодействия эластичных полимерно-абразивных кругов с обрабатываемой поверхностью, сил взаимодействия, съема материала (производительности процесса), шероховатости обработанной поверхности, температуры в зоне обработки, износа инструмента являются подсистемами третьего и четвертого уровней в пространстве состояний в рамках системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки.

*В четвертой главе* исследован технологический процесс скругления острых кромок деталей полимерно-абразивным радиальным инструментом как на легкодоступных прямолинейных, так и на труднодоступных наклонных участках деталей. Теоретически рассчитаны и экспериментально исследованы силы взаимодействия ворсин цельнолитых полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой кромкой. Обоснованы причины неравномерности съема материала на входе в процесс резания и выходе из него, при обработке кромок. Предложены различные параметры оценки производительности процесса обработки при скруглении кромок и качества обработанных кромок. Экспериментально исследованы износостойкость инструментов, производительность процесса обработки кромок и качество поверхности скругленных кромок. Разработанная теоретическая математическая модель силового взаимодействия ворсин цельнолитых полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой кромкой является подсистемой третьего уровня, а эмпирические математические модели производительности процесса и качества обработки кромок, износа эластичных полимерно-абразивных кругов и щеток являются подсистемами четвертого уровня в рамках системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки.

*В пятой главе* рассмотрены вопросы обеспечения производительности процесса обработки и качества поверхности при зачистке плоскостей и скруглении кромок цельнолитыми торцевыми полимерно-абразивными щетками. Разработаны теоретические положения силового взаимодействия ворсин торцевых полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой поверхностью. Установлены закономерности влияния режимных параметров обработки на производительность процесса обработки и качество обработанной поверхности. Экспериментально исследована температура в зоне резания при обработке кромок и аналитически исследована температура при обработке плоскостей торцевыми полимерно-абразивными щетками. Путем экспериментальных исследований получена информация об интенсивности износа торцевых



щеток при обработке ими как плоскостей, так и кромок. Разработанные аналитические модели силового взаимодействия ворсин торцевых полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой плоскостью и кромкой являются подсистемами третьего уровня, а аналитические модели температуры в зоне обработки при обработке плоскостей, а также математические модели производительности процесса и качества обработки плоскостей и кромок, температуры на кромке в зоне резания, износа торцевых щеток при обработке плоскостей и кромок, полученные на основе экспериментальных данных, являются подсистемами четвертого уровня в рамках системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки.

В шестой главе рассмотрены возможности работы полимерно-абразивных щеток при высоких скоростях, а также возможности обработки криволинейных, наклонных и труднодоступных участков, в том числе с использованием современного промышленного робота. Разработаны эмпирические математические модели производительности процесса (размер кромки) и шероховатости поверхности при обработке кромок на промышленном роботе, который обладает специфическими особенностями (заниженная по сравнению с фрезерными станками жесткость, повышенная чувствительность к колебательным явлениям). Также приведено описание разработанного специального оборудования (станок с ЧПУ), предназначенного для скругления кромок длинномерных авиационных деталей исследованными полимерно-абразивными инструментами.

В седьмой главе описана разработанная на основе проведенного комплекса теоретических и экспериментальных исследований система оптимального управления проектированием операций финишной обработки деталей из алюминиевых и титановых сплавов полимерно-абразивными инструментами, состоящая из входных параметров, пространства состояний и выходных параметров. Представлен и описан алгоритм проектирования операций финишной обработки, который может быть применен при использовании различных полимерно-абразивных инструментов. Для реализации предложенной системы оптимального управления проектированием и удобства ее применения в практических целях разработано соответствующее программное обеспечение. Также предложены технологические рекомендации, которые могут найти широкое применение в обрабатывающей промышленности.

#### **Научная новизна** полученных результатов:

1. На основе системного анализа исследуемого процесса разработан комплекс теоретических положений, которые описывают взаимосвязи параметров производительности процесса обработки и качества обработанной поверхности с режимными параметрами обработки, физико-механическими свойствами обрабатываемого материала и характеристиками инструмента при обработке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами и щетками и являются приемлемыми для большинства случаев обработки поверхностей такими инструментами (соответствует п. 4 и п. 7. паспорта специальности 05.02.08).
2. На основе разработанных теоретических положений создан комплекс аналитических математических моделей (подсистем), входящих в пространство состояний системы управления

проектированием операций финишной обработки (*соответствует п. 3. паспорта специальности 05.02.08*), а именно:

- съема материала (производительности процесса) при обработке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами;
- шероховатости обработанной поверхности при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами;
- силового взаимодействия эластичных полимерно-абразивных кругов с обрабатываемой поверхностью;
- силового взаимодействия полимерно-абразивных радиальных щеток с обрабатываемой кромкой;
- силового взаимодействия полимерно-абразивных торцевых щеток с обрабатываемой поверхностью;
- силового взаимодействия полимерно-абразивных торцевых щеток с обрабатываемой кромкой.

3. Разработаны математические модели ограничительных функций по теплообразованию с целью реализации управляющей подсистемы оптимизации технологических процессов зачистки поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами и торцевыми щетками (*соответствует п. 3. и п.5 паспорта специальности 05.02.08*).

4. Разработана и экспериментально подтверждена теоретическая математическая модель формирования остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое материала при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами, учитывающая силовой и температурный факторы влияния (*соответствует п. 7 паспорта специальности 05.02.08*).

5. Получена совокупность эмпирических моделей, позволяющих оценивать производительность процесса и качество обработанных кромок по контролируемым параметрам при обработке радиальными и торцевыми полимерно-абразивными щетками в зависимости от режимных параметров обработки и характеристик инструмента (*соответствует п. 2 и п.7 паспорта специальности 05.02.08*).

6. Решена задача определения целевой функции расхода электроэнергии в рамках реализации системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки, путем математического моделирования сил резания и требуемой мощности оборудования (*соответствует п. 3. паспорта специальности 05.02.08*).

7. Разработана управляющая подсистема оптимизации зачистки поверхностей полимерно-абразивными инструментами, обеспечивающая выбор оптимального инструмента и режимных параметров обработки, при которых достигается требуемое качество обработки при оптимальной производительности и наименьшей себестоимости выполнения операции (*соответствует п. 5. паспорта специальности 05.02.08*).

8. Разработана управляющая подсистема оптимизации формирования скругленной кромки по размеру, шероховатости, точности формы и ориентации для радиальных и торцевых полимерно-абразивных щеток на основе совокупности эмпирических моделей, описывающих взаимосвязи производительности процесса обработки, шероховатости обработанной кромки, температуры в зоне резания и износа инструмента от режимных параметров обработки (*соответствует п. 5. паспорта специальности 05.02.08*).

**Практическая значимость работы:**

1. Разработана совокупность методик и теоретических положений, позволяющих определять оптимальный инструмент и технологические режимные параметры обработки при различных требованиях к качеству обработанной поверхности и кромки с оптимальной производительностью процесса обработки и наименьшей себестоимостью выполнения операции.
2. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенную совокупность теоретических положений и позволяющее эффективно управлять процессами финишной обработки на основе оптимизационных решений: выбирать оптимальный полимерно-абразивный инструмент и режимные параметры обработки при зачистке поверхностей и скруглении кромок деталей.
3. Предложена система оптимального проектирования исследуемых технологических операций, а также технологические рекомендации для финишной обработки полимерно-абразивными инструментами, в том числе на промышленных роботах, которые могут найти широкое применение в обрабатывающей промышленности.
4. Разработанные теоретические положения взаимодействия режущего микрорельефа эластичных полимерно-абразивных кругов (ворсин полимерно-абразивных щеток) с обрабатываемой поверхностью могут быть успешно адаптированы и применены для решения проблемы эффективного выбора полимерно-абразивного инструмента и параметров обработки в других сферах инженерной деятельности, а именно: ремонт автомобилей, строительство и т.д.
5. Разработан проект промышленного оборудования (станка с ЧПУ) для одновременной эффективной обработки кромок длинномерных авиационных деталей типа профиль двумя полимерно-абразивными щетками.

**Методология и методы исследования.** При выполнении работы были использованы современный математический аппарат, основополагающие фундаментальные положения физических процессов удара, упругости, пластичности, теория резания, научные основы технологии машиностроения, статистические методы исследования.

Экспериментальные исследования проводились с использованием современных технических средств отечественного и зарубежного производства таких как профилометр Taylor Hobson Form Talysurf i200 (Великобритания), трехкомпонентный динамометрический комплекс фирмы Kistler 9253B23 (Швейцария), тепловизор FLIR Orion SC7000M (Швеция), большой инструментальный микроскоп с цифровым отсчетным устройством БМИ 1Ц (Россия),

оптический профилометр Bruker Contour GT-KI (Германия), балансировочная машина Haimer TD2009 Comfort Plus (Германия), аналитические весы Ohaus серии Discovery (DV) модель DV214C (Швейцария), дифрактометр XStress G3/G3R (Финляндия), металлографический Микроскоп Микромед МЕТ-2 (Россия – Китай), растровый электронный микроскоп JIB-Z4500 Multibeam (Япония).

При разработке программ оптимизации было использовано программное обеспечение *Borland C++ Builder 6*. Для проведения расчетов и статистической обработки экспериментальных данных были задействованы программные пакеты *Microsoft Excel*, *Statsoft Statistica 10* и *Enterprise Mathcad Edition 15*.

#### **На защиту выносятся:**

1. Система оптимального управления проектированием операций финишной обработки поверхностей и скругления кромок полимерно-абразивными инструментами с комплексом подсистем нескольких уровней.
2. Математические модели производительности процесса обработки и качества обработанной поверхности, разработанные на основе аналитически описанного режущего микрорельефа эластичных полимерно-абразивных кругов, а также экспериментально исследованных физико-механических свойствах инструмента и обрабатываемого материала.
3. Комплекс математических моделей, которые разработаны на основе теоретических положений и входят в систему управления проектированием операций финишной обработки:
  - съема материала (производительности процесса) при обработке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами;
  - шероховатости обработанной поверхности при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами.
  - силового взаимодействия эластичных полимерно-абразивных кругов с обрабатываемой поверхностью;
  - силового взаимодействия полимерно-абразивных радиальных щеток с обрабатываемой кромкой;
  - силового взаимодействия полимерно-абразивных торцевых щеток с обрабатываемой поверхностью;
  - силового взаимодействия полимерно-абразивных торцевых щеток с обрабатываемой кромкой.
4. Совокупность эмпирических математических моделей, позволяющих прогнозировать производительность процесса и качество обработанных кромок при обработке радиальными и торцевыми полимерно-абразивными щетками в зависимости от режимных параметров обработки и характеристик инструмента.

5. Методика определения целевой функции расхода электроэнергии, необходимая для проведения оптимизации финишной обработки деталей полимерно-абразивными инструментами, полученная на основе разработанных теоретических положений силового взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью при обработке:

- плоскостей эластичными полимерно-абразивными кругами;
- плоскостей торцевыми полимерно-абразивными щетками;
- кромок радиальными полимерно-абразивными щетками;
- кромок торцевыми полимерно-абразивными щетками.

6. Управляющие подсистемы оптимизации выбора инструмента и режимных параметров обработки при зачистке поверхностей и скругления острых кромок деталей, позволяющие выполнять эти операции наиболее экономически эффективно с использованием ограничительных функций по разработанным теоретическим и эмпирическим математическим моделям:

- износа инструмента;
- температуры в зоне резания;
- достижимой шероховатости обработанной поверхности.

7. Теоретические обоснования расчета остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое материала при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами, подтвержденные совокупностью экспериментальных исследований.

**Достоверность результатов**, обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается корректностью постановки задач, комплексным, системным подходом к проведению исследований, обоснованностью принятых теоретических положений, подтвержденных результатами экспериментальных исследований, использованием современного металлообрабатывающего оборудования и измерительных средств, статистической обработкой экспериментальных данных при заданной доверительной вероятности, а также результатами опытно-промышленной апробации наиболее значимых положений работы.

**Личный вклад соискателя** состоит в детальной проработке проблемы в целом с использованием литературных источников, проведении системного анализа предметной области, выполнении комплекса теоретических исследований, рациональном планировании экспериментов, проектировании и изготовлении специального оборудования для проведения экспериментов, разработке и тестировании аналитических и эмпирических математических моделей, создании единой методики проектирования операции и алгоритмов оптимизации финишной обработки и соответствующего программного обеспечения, формулировании выводов диссертации. В работах, полученных в соавторстве, личный вклад автора состоит в самостоятельном формулировании цели и задач исследований, полном участии во всех теоретических исследованиях, правильной интерпретации полученных результатов и формулировании выводов. Экспериментальная часть работы проведена лично автором или под его руководством. Все основные идеи, вы-

явленные закономерности, положенные в основу диссертации, а также все результаты диссертации, которые составляют научную новизну и выносятся на защиту, получены лично автором.

#### **Апробация.**

Основные положения диссертационной работы были представлены на:

- интернет-конференции с международным участием «Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении» (г. Тюмень, 2012 г.);
- международном форуме по проблемам науки, техники и образования «III тысячелетие – новый мир» (г. Москва, 2012 г.);
- III научно-практической конференции «Молодежь. Проекты. Идеи» (Иркутский авиационный завод – филиал ПАО «Научно-производственная корпорация «Иркут», г. Иркутск, 2013 г.);
- международной научно-технической конференции «Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы, решения» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2013 г.);
- всероссийских научно-технических конференциях «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (г. Иркутск, 2011, 2012, 2015, 2017 гг.);
- I международной научно-практической конференции «Машины, агрегаты и процессы: проектирование, создание и модернизация» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.);
- международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям Far East Con–2018 (г. Владивосток, 2018 г.);
- международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (ICMTMTE–2018) (г. Севастополь, 2018 г.);
- международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (ICIE–2019) (г. Сочи, 2019 г.).

Диссертационная работа в полном объеме заслушивалась и обсуждалась на:

- научном семинаре «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений», посвященному 90-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора техн. наук, профессора Э.В. Рыжова, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск, 16 ноября 2018 г.;
- расширенном заседании кафедры «Технологии машиностроения» ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, 19 ноября 2018 г.;
- расширенном заседании кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза, 22 ноября 2018 г.;
- расширенном заседании кафедры «Конструирования и стандартизации в машиностроении» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, 7 мая 2019 г.

**Практическая реализация работы.** Разработанная система оптимального управления проектированием операций финишной обработки полимерно-абразивными инструментами и технологические рекомендации приняты к внедрению на Иркутском авиационном заводе – филиале ПАО «Научно-производственная корпорация «Иркут», в учебный процесс ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет, использованы при написании отчетов по выполнению комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» (договор №389/12 от 15.11.2012 г.) и договору № 6/16 от 18.01.2016 г. «Разработка механизированных/автоматизированных технологий обработки кромок деталей каркаса» между ПАО «Научно-производственная корпорация «Иркут» и ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Разработанные рекомендации по технологическому и инструментальному обеспечению финишной обработки полимерно-абразивными инструментами нашли свое применение и в других сферах деятельности, а именно: ремонт автомобилей, строительство, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Материалы диссертации использовались при выполнении госбюджетной НИР по плану ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»: §47/191 «Формирование поверхностного слоя при зачистке деталей».

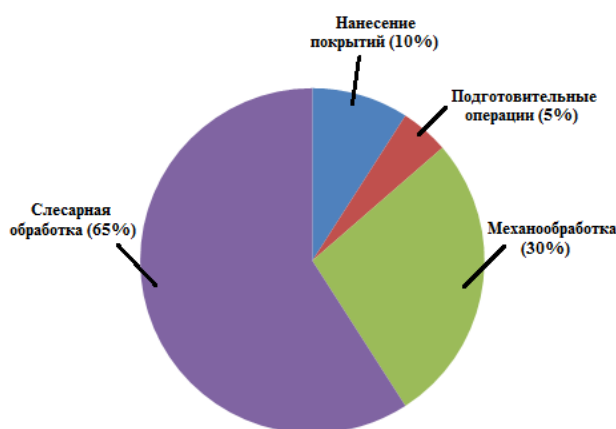
**Публикации.** По материалам исследований опубликовано более 40 печатных работ, из них 1 монография, 24 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, включённых Высшей аттестационной комиссией России в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание учёной степени кандидата и доктора наук, 8 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в наукометрические системы Web of Science или Scopus, 1 патент на изобретение, 2 патента на полезную модель, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, библиографического списка и приложений. Основной текст содержит 356 страниц, включая 199 рисунков, 122 таблицы и библиографический список из 355 наименований.

*Автор выражает глубокую признательность научному консультанту, заслуженному профессору Иркутского национального исследовательского технического университета, доктору технических наук, профессору Юрию Владимировичу Димову за ценные советы, высококвалифицированные научные консультации и методологическую помощь при работе над диссертацией.*

# 1 Анализ состояния вопроса в области теоретических и экспериментальных исследований процесса финишной обработки деталей. Постановка задачи исследования

На сегодняшний день отечественные автомобилестроительные, авиастроительные и другие машиностроительные предприятия активно приобретают и внедряют в производственный процесс современные, высокоэффективные станки с ЧПУ, робототехнические комплексы и другое современное оборудование. Однако при этом финишные операции такие как зачистка поверхностей, скругление острых кромок, подготовка поверхностей под лакокрасочные и



**Рисунок 1.1 – Диаграмма распределения трудоемкости изготовления фрезерованных деталей из алюминиевых сплавов [256]**

галванические покрытия, удаление дефектного слоя и т. п. продолжают выполняться при помощи низкопроизводительного и неквалифицированного ручного труда, а, следовательно, повышается себестоимость изделий и снижается их качество. По данным работы [256], в авиастроении доля трудоемкости ручных работ по финишной обработке деталей, получаемых фрезерованием, может достигать 65%. (рисунок 1.1). Даже при хорошо организованной технологии изготовления деталей фрезерованием, в том числе на станках с ЧПУ, из материалов, применяемых в авиастроении, возникает необходимость зачистки поверхностей в местах переходов при изменении направления подачи, при выполнении криволинейных поверхностей и поверхностей в трехмерном пространстве с ограниченной величиной углового шага двигателя станка с ЧПУ, при возникновении случайных дефектов на обработанной поверхности, в случае невозможности получения фрезерованием требуемой шероховатости.

Кроме того, в конструкцию любого самолета входит немалое количество длинномерных деталей типа профилей, длина которых достигает 10 м и более, а также крупногабаритных оребренных деталей, снятие заусенцев и скругление кромок на которых производится вручную. Трудоемкость ручной обработки на этих финишных операциях очень большая.

Такие операции могут успешно осуществляться вращающимися абразивными инструментами на гибкой (полимерной) связке, в том числе кругами и щетками.

Учитывая все вышеизложенное, следует констатировать тот факт, что проблема замены ручного труда на механизированный и автоматизированный на финишных операциях и, как следствие, повышение производительности труда, для отечественной промышленности остаются весьма актуальными.



## 1.1 Краткая характеристика основных видов абразивной обработки

К абразивной обработке материалов относятся: шлифование, полирование, обработка деталей свободным абразивом, обработка деталей эластичным инструментом, хонингование, и др.

**Шлифование** – это разновидность абразивной обработки, основными видами которой являются: круглое (наружное и внутреннее); плоское (торцом и периферией); планетарное; профильное (зубо-, резьбо-, шлицешлифование); глубинное; бесцентровое; обдирочное.

Важными факторами, влияющими на процесс шлифования и его результаты по производительности и качеству обработанной поверхности являются: *материал абразивного зерна* (искусственного происхождения (алмаз синтетический, эльбор, карбид бора, карбид кремния, электрокорунд нормальный, электрокорунд белый, хромотитановый электрокорунд, циркониевый электрокорунд, магниевый-кремниевый электрокорунд, сферокорунд, формокорунд, окись хрома, двуокись тория, полирит, окись алюминия, сапфировая пудра, двуокись циркония, техническое стекло и т.д.) или природного происхождения; *зернистость и зерновой состав*; *пористость круга*; *связка круга* (керамическая, силикатная, магнезильная, бакелитовая, вулканитовая); *твердость*; *структура* (соотношение в единице объема зерен, связки и пор); *класс дисбаланса* (определяет допустимые отклонения от статистического баланса).

Вопросам шлифования и обеспечения качества поверхностного слоя при шлифовании посвящено множество работ [9, 24, 27, 28, 132, 150, 151 и др].

**Полирование** является финишным процессом при изготовлении деталей. При полировании происходит снятие очень тонких слоев с поверхности обрабатываемого изделия, которое позволяет придать ей очень малую шероховатость (как правило поверхность полируется до состояния зеркального блеска). Различаются различные разновидности полирования, например: ручное, машинное, гидроабразивное, ультразвуковое и т.д. Вопросам полирования посвящено множество работ таких как [314, 342, 344, 345, 346, 349, 354 и др.]. Во многих из них [342, 344, 346] исследуется влияние режимов обработки на качество поверхностного слоя.

**Обработка деталей свободным абразивом** включает в себя большое разнообразие способов. К ним относятся: *вибрационная* (общего назначения, виброшпиндельная, вибромагнитная, вибрационная обработка проходного типа длинномерных деталей, с дополнительным колебанием контейнера или детали, с дополнительным вращением и поступательным движением контейнера, ультразвуковая); *галтовочная во вращающихся барабанах* (центробежно-планетарная, турбуляционная, галтовочная); *в псевдокипящем слое* (с механическим барботированием, импеллерная, с барботированием воздухом, с деформированием эластичных стенок, центробежно-ротационная, турбоабразивная); *струйная* (роторно-струйная, ленточно-роторно-струйная, ударно-импульсная, центроострелительно-струйная, центробежно-струйная, пневмо- и гидроструйная); *потоком свободного абразива* (прокачкой суспензии, прокачкой уплотненной суспензии, вихревым потоком суспензии, с дополнительными обраба-

тывающими элементами внутри детали); *в слое свободного абразива* (абразивом, уплотненным инерционными силами, магнитно-абразивная, движением детали в слое абразива).

Объединяет все эти способы и их разновидности единый процесс съема материала и формирования обработанной поверхности и поверхностного слоя. Он заключается во взаимодействии свободной абразивной частицы (гранулы или абразивного зерна) с обрабатываемым материалом, в результате которого происходит съем материала и формирование таких показателей качества поверхности и поверхностного слоя, как шероховатость, наклеп, остаточные напряжения, шаржированность продуктами износа и т.д.

Вопросы обработки свободным абразивом исследованы достаточно глубоко [15, 16, 17, 57, 91, 92, 102, 133, 191, 222, 225, 268 и др]. Отечественной и зарубежной промышленностью проектируется и выпускается большое количество оборудования для промышленного применения данной разновидности обработки.

**Обработка деталей эластичным абразивным инструментом** может осуществляться следующими инструментами [59]: *инструменты из шлифовальных полотен* (шлифовальная шкурка и полотно, покрытое абразивом в том числе лепестковые круги различной конструкции, абразивосодержащее полотно, неабразивное полотно с введением абразивных частиц в зону резания); *круги с абразивным покрытием*; *абразивосодержащие* круги из нетканых материалов с использованием синтетических и природных волокон, а также волокон с антипригарными и антистатическими добавками; *абразивные круги на связке*: бакелитовой, вулканитовой, глифталевой, пропланой, эпосикаучуковой, сложной синтетической, на основе вспененного полиуритана; *полимерно-абразивные щетки из абразивосодержащих нитей* (радиальные, торцевые, чашечные, тарельчатые, кистевые, щетки для отверстий (ерши), а также щетки с закрепленными на ворсинах эластичными полимерно-абразивными шариками); *цельнолитые полимерно-абразивные щетки* (радиальные, торцевые, радиальные и торцевые из секций); *щетки из ворса с абразивным покрытием* разного конструктивного исполнения; *щетки из полосок шлифовальной шкурки*.

Исследованиям процессов обработки эластичными абразивными кругами посвящен ряд работ [58, 59, 193, 194, 195, 216, 260], также ряд публикаций имеется и по обработке полимерно-абразивными щетками из абразивосодержащих нитей [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 18, 129, 176, 177, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 266]. Однако, целостной картины процесса взаимодействия эластичного инструмента с обрабатываемой поверхностью и формирования показателей качества обработанной поверхности с обеспечением оптимальной производительности не просматривается. Учитывая, что ворсины цельнолитых щеток существенно отличаются по форме и поперечному сечению от абразивосодержащих нитей, результаты исследований, приведенные в перечисленных публикациях, для цельнолитых полимерно-абразивных щеток малопримемлемы. Публикации результатов исследований в области обработки деталей цельнолитыми полимерно-абразивными щетками (радиальными и торцевыми) в принципе отсутствуют. Поэтому

для применения данной разновидности инструмента при финишной обработке авиационных деталей требуются особые фундаментальные исследования.

Каждый из вышеописанных методов абразивной обработки можно охарактеризовать различным уровнем эффективности. Каждому из методов присущи определенные преимущества и недостатки, а также области эффективного применения [91].

Одной из перспективных и практически не исследованных технологий финишной обработки является обработка эластичными полимерно-абразивными кругами со связкой из нетканых материалов и цельнолитыми щётками (радиальные и торцевые)

Данная технология способна эффективно решать актуальную задачу для современного машиностроения (в частности – авиастроения) по механизации и автоматизации ручного труда при финишных операциях, на которых применение рассмотренных выше методов абразивной обработки затруднительно по целому ряду причин. Например: уменьшение шероховатости до требуемых значений при обработке деталей из широко применяемых в авиастроении алюминиевых сплавов, а также скругление острых кромок на авиационных деталях из алюминиевых и титановых сплавов с требуемыми малыми размерами и точностью.

## **1.2 Технологии финишной обработки полимерно-абразивными инструментами**

Полимерно-абразивные инструменты могут применяться для: финишной обработки с целью придания обрабатываемой поверхности требуемой шероховатости, подготовки ее под лакокрасочные покрытия, удаления заусенцев, скругления острых кромок, предварительной обработки перед полированием и гляцеванием и т. п. При этом обрабатываться могут различные металлы и их сплавы, пластмасса, дерево, стекло, керамика и камни [58, 59, 69].

Нельзя не отметить, что у данного вида абразивного инструмента есть несомненные преимущества перед жестким инструментом, заключающиеся в эластичности и безопасности [342].

Среди эластичных абразивных инструментов различают [58, 59]: круги и щётки радиальные, торцевые, чашечные и тарельчатые, кистевые, щетки для отверстий (ерши), а также щетки с ворсом с закрепленными эластичными полимерно-абразивными шариками и т.д.

Однако эти инструменты, как и любые другие, обладают множеством особенностей, без владения информацией о которых невозможно говорить об эффективности применения их в производственных условиях.

Для изучения и эффективного применения этого инструмента необходим системный подход по анализу заданной проблемной ситуации.

Вопросам системного анализа посвящены работы В.Г. Болтянского [29], М. Месаровича [140], С.Н. Музыкаина [145] и др., в которых рассмотрены общие вопросы системного

управления процессами. Применительно к абразивной обработке, системное управление процессами рассмотрено в работах Ю.К Новоселова [150], А.Е. Зверовщикова [91], С.М. Братана и др. [26, 31]. Однако, применительно к финишной обработке абразивными инструментами на гибкой (полимерной) связке, публикации по системному анализу и системам управления процессом обработки в принципе отсутствуют.

Целью системного анализа исследуемой технологической операции должна являться разработка единого методологического подхода к проектированию операции финишной обработки полимерно-абразивными инструментами, способного обеспечивать требуемое качество (по шероховатости поверхностей, остаточным напряжениям, размерам и геометрической точности кромок) с оптимальной производительностью процесса при большом разнообразии конструкций инструментов (круги различной жесткости и зернистости, щетки радиальные и торцевые разнообразной конструкции и зернистости), форм обрабатываемых поверхностей (плоские и цилиндрические поверхности, кромки) и их взаимного расположения.

Внедрение процессов финишной обработки эластичными полимерно-абразивными инструментами неизбежно связано с необходимостью в каждом конкретном случае определять оптимальные тип (эластичные полимерно-абразивные круги, щетки), конструкцию (радиальные, торцевые и др.) инструмента, его физико-механические свойства, условия процесса обработки и режимные параметры обработки.

### **1.2.1 Теоретические основы взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью**

Производительность процесса обработки и качество обработанного изделия определяются характером взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью.

Взаимодействие полимерно-абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью характеризуется рядом особенностей, свойственных данному методу обработки:

1. При зачистке поверхностей авиационных деталей эластичными полимерно-абразивными кругами, припуска на обработку не предусматривается. Целью зачистки является уменьшение величины исходной шероховатости до требуемых нормативно-техническими документами (далее – НТД) значений.
2. Инструмент в принципе не подвергается правке. Его режущий микрорельеф формируется только за счет износа в процессе работы и «самозатачивания».
3. Полное отсутствие данных о концентрации абразива в инструменте затрудняет аналитическое описание режущего микрорельефа.
4. Полимерная связка инструментов очень чувствительна к повышению температуры в зоне обработки.

Вышеперечисленные особенности необходимо учитывать при создании научных основ данного метода обработки.

### ***Моделирование единичного зерна и процесс резания абразивным зерном***

Многими российскими и зарубежными исследователями [103, 272, 287, 288, 289, 305, 311, 319, 331, 337 и др.] принято допущение, что вершину абразивного зерна можно представить в виде вершины лезвийного инструмента, имеющего радиусную форму. При аналитических исследованиях, в качестве модели единичного зерна автор работы [57] принимает конус с закругленной по радиусу вершиной, автор [111], при изучении шлифования, принимает конус с углом  $90^\circ$  и площадкой износа на вершине около 0,1 мм, В.В. Петросов [173] при исследовании гидроабразивной обработки принимает в качестве модели зерна сферическое тело. В работе [304] форма вершины абразивного зерна также аппроксимирована сферой. Е.Н. Маслов [132] принимает в качестве модели зерна треугольник с закругленной вершиной.

Для имитации выступа абразивного зерна, автором [91] предложена новая фигура, названная вариационным многогранником. Следует отметить, что данная фигура применима только для моделирования с применением методов конечно-элементного анализа.

Согласно [57], при взаимодействии абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью, его единичный микровыступ производит упругое и пластическое деформирование материала. После соприкосновения с поверхностью начинается упругое деформирование, переходящее, по мере углубления, в пластическое. Глубина внедрения зерна зависит от кинетической энергии перемещения в нормальном к поверхности направлении [57]. При достижении нормальной составляющей скорости относительного движения нулевого значения начинается вытеснение частицы под действием слоев материала, находящегося в упругодеформированном состоянии [57]. Перемещение зерна в направлении, параллельном обрабатываемой поверхности, сопровождается микрорезанием материала заготовки.

Количество снятого в процессе обработки материала, складывается из объемов, которые превратились в стружку и разрушенных в результате полидеформирования. На интенсивность съема за счёт полидеформирования влияют объём пластически- и упругодеформированного материала при действии единичного зерна, а также количество этих воздействий, происходящих на единицу поверхности в единицу времени [57]. Достижимая шероховатость определяется поперечными и продольными сечениями рисок, наносимых единичными зёрнами на поверхность.

### ***Взаимодействие абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью***

Согласно [57], при внедрении зерна под углом к поверхности, впереди его образуется валик наплыва, который при определенных условиях может переходить в стружку. Пластически оттесненный материал, обтекая зерно без отделения от основной массы, образует наплыв по его боковым сторонам.

Качественные параметры процесса финишной обработки в большой степени зависят от рельефа режущей поверхности абразивного инструмента, оцениваемого посредством микро- и макрогеометрии [11, 332].

В процессе обработки, абразивный круг своим режущим профилем под действием сил, возникающих в результате его сближения с обрабатываемой поверхностью, производит сьем материала и формирование поверхностного слоя по шероховатости, остаточным напряжениям, наклепу и другим показателям [30, 58].

В работе [194] рассмотрены схемы контакта и приведены расчеты пятна контакта эластичного полимерно-абразивного цилиндрического круга с плоскостью и внутренней цилиндрической поверхностью. Отмечено, что одним из важных показателей в вопросе оптимизации финишной обработки эластичными полимерно-абразивными инструментами является площадь контакта инструмента и обрабатываемой поверхности, т.к. именно от нее зависит объем снятого материала в единицу времени при одной и той же концентрации абразива в инструменте. Величина пятна контакта, возникающая в момент касания инструмента с обрабатываемой поверхностью, существенно изменяется после стабилизации процесса резания.

Е.Н. Маслов [132], А.Г. Суслов [218, 219, 220] и другие исследователи посвящают существенную часть своих работ созданию математических моделей контактного взаимодействия различных поверхностей, а также математическому моделированию качества поверхностного слоя деталей при различных способах абразивной обработки.

В.А. Щеголев [260] при исследовании взаимодействия эластичного абразивного круга с обрабатываемой поверхностью представляет режущий микрорельеф и шероховатую поверхность в виде случайных функций, которые при взаимодействии рассматриваются как стержневые модели, позволяющие описывать случайные поверхности. Затруднением при решении практических задач данным методом является необходимость знания вероятностных моделей контактирующих поверхностей и их дисперсий. К сожалению, рекомендаций по решению этой проблемы в работе [260] нет.

Таким образом, следует констатировать, что для определения производительности процесса обработки и закономерностей формирования поверхностного слоя по шероховатости, наклепу, остаточным напряжениям и другим показателям, подавляющее большинство исследователей аппроксимирует единичное зерно той или иной геометрической фигурой и моделирует процесс взаимодействия единичного зерна абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью с последующим математическим описанием взаимодействия совокупности абразивных зерен поверхности инструмента с материалом обрабатываемой заготовки.

В целом, необходимо отметить, что для полимерно-абразивных инструментов подобных исследований проводилось крайне мало. Поэтому, для изучения взаимодействия полимерно-абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью детали необходимо определиться с аппроксимацией зерна определенной геометрической фигурой, определить количество зерен, участвующих в процессе резания и глубину их внедрения в материал детали, количество материала, которое может удалить данный инструмент за акт взаимодействия, а также

исследовать структуру режущего микрорельефа и силы, с которыми действуют абразивные зерна на обрабатываемую поверхность.

### *Микрогеометрия режущей поверхности абразивного инструмента*

Режущая поверхность различных абразивных инструментов исследовалась во многих работах, например [99, 158, 248, 249, 252, 268 и др.].

Проведенные исследования микрогеометрии абразивного зерна [99, 252, 268] показали, что на поверхности зерна существуют как микро- так и субмикровыступы, которые образуются при правке абразивного инструмента и разрушении в процессе резания.

В работах [133, 198, 252, 268] отмечено, что микро- и субмикровыступы абразивных зерен могут играть роль самостоятельных царапающих элементов, которые снимают стружку в 10...100 раз меньшую по объему по сравнению с основным царапающим элементом.

Авторами [1, 158] отмечено, что случайный характер размера, формы и взаиморасположения абразивных зерен в ограниченном объеме пространства инструмента описывается законом нормального распределения.

Авторы [190] математически описывают режущую поверхность с помощью аналитических соотношений теории случайных функций согласно [35, 206, 232].

В работах [248, 249] для описания рабочей поверхности шлифовальных кругов использован тот же математический аппарат теории случайных функций, что и у предыдущих авторов, которыми отмечается, что наиболее удобным видом распределения для описания всех возможных случаев разновысотности режущих кромок на рабочей поверхности является двухпараметрическое бета-распределение.

Отмечено [112], что эффективность процесса шлифования непосредственно зависит от состояния рельефа режущей поверхности кругов. Установлены закономерности, которые являются исходными данными при расчете параметров фактического рельефа режущей поверхности абразивного инструмента.

В работе [247] разработана математическая модель формирования рабочей поверхности абразивного инструмента при шлифовании с учетом вероятности видов изнашивания и использованием переходных вероятностей, определяющих размерный износ зерен в результате истирания, скалывания и вырывания.

В качестве метода получения первичной информации о рельефе рабочей поверхности лепесткового круга, авторами [57, 262, 285] принято профилографирование, отличающееся от других методов простотой и большим объемом получаемой информации.

Существует большой опыт оценки шероховатости поверхности с помощью случайных функций [57, 58, 84, 128, 203, 252], согласно которому можно представить микропрофиль инструмента в виде случайного стационарного процесса, реализацией которого будет являться профилограмма.

По аналогии с шероховатостью поверхности, микрорельеф режущей поверхности можно оценить с помощью случайных функций [58, 84, 128, 203]. Автором [57] установлено, что абразивный инструмент описывается случайным стационарным процессом с нормальным законом распределения. При этом, согласно [58, 84, 232], для полного описания нормального случайного процесса необходимо иметь информацию только об его математическом ожидании (для микрорельефа равно нулю) и корреляционной функции:  $K(\tau) = \sigma^2 \cdot \rho(\tau)$ , где  $\tau$  – расстояние между точками профиля;  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение случайного процесса;  $\rho(\tau)$  – нормированная корреляционная функция.

Согласно [58, 262, 285], для определения необходимых параметров при расчете взаимодействия режущего микрорельефа с обрабатываемой поверхностью (глубины внедрения абразивных зерен; количества зерен, находящихся в контакте; радиуса закругления вершин зерен) достаточно найти по профилограмме среднее квадратичное отклонение профиля  $\sigma$  и особые точки: число нулей (пересечение со средней линией)  $n(0)$  и число максимумов  $m$ .

Стоит отметить, что обычно в резании участвует не более 20% режущих зерен, расположенных на рабочей поверхности круга. Таким образом, поверхность заготовки формируется не всеми участвующими в работе абразивными зёрнами [194].

Коллективом авторов [87] отмечено, что при выборе полимерно-абразивного инструмента следует обращать внимание на следующие параметры: материал полимерного волокна, материал абразивного зерна, диаметр и вылет полимерного волокна, тип инструмента (дисковый, чашечный), режимы обработки, обрабатываемый материал. Установлено, что наиболее высокая производительность процесса обработки и качество поверхности получаются при обработке полимерно-абразивными инструментами с материалом зерна из карбида кремния. Это согласуется с данными работы [216], в которой автором также отмечена более высокая эффективность инструментов (дисковых полимерно-абразивных) с материалом зерна карбид кремния 63С при обработке жаропрочного титанового сплава ВТ8-М.

#### ***Силы взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью***

Для определения силы взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью в некоторых работах [57, 111, 173] использован анализ действия единичного зерна на обрабатываемый материал с последующим переходом на взаимодействие абразивного инструмента в целом с обрабатываемой деталью.

Для расчёта силы, действующей на единичное зерно, и интенсивности деформации пластически оттесняемого материала Ю.В. Димов [57] использовал метод линий скольжения (метод характеристик).

При движении единичного зерна в идеально жесткопластическом полупространстве под углом  $\delta$  к поверхности на него действует сила, возникающая в результате:

- пластического деформирования материала;



- оттеснения заторможенной зоны и трения ее о поверхность зерна при движении вверх в виде стружки;
- трения зерна о пластически деформированный материал;
- воздействия динамической составляющей пластического деформирования.

Для удобства решения всю поверхность зерна, находящуюся в контакте с пластически деформированным материалом, автор [57] разбил на два участка (сферический и конический) и определил на них указанные составляющие силы.

Исследования сил взаимодействия лепесткового абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью было проведено в работах [39, 58, 84]. В основу расчета сил авторы положили воздействия единичного лепестка на обрабатываемую поверхность.

В работах [58, 84] отмечено, что при обработке деталей цилиндрическими лепестковыми кругами единичный лепесток действует на обрабатываемую поверхность силой, состоящей из двух составляющих. Первая (упругая) составляющая  $R_{yn}$  возникает в результате изгиба лепестка, имеющего жесткость  $H = E \cdot J$ , при его деформации на величину  $\Delta$  ( $E$  - модуль упругости материала лепестка;  $J$  – осевой момент инерции:  $J = \frac{B \cdot h^3}{12}$ , где  $B$  и  $h$  ширина и толщина лепестка).

Вторая (центробежная) составляющая  $R_{cy}$  создается за счет центробежной силы при вращении лепесткового круга.

В целом силы, действующие лепестковым кругом на обрабатываемую поверхность, определяются как сумма сил единичных лепестков, участвующих в контакте.

Для цельнолитого абразивного круга со связкой из эластичного нетканого материала такой подход неприемлем, поскольку деформируется вся прилегающая к поверхности детали часть круга.

Авторы [348] также отмечают, что контактная жесткость шлифовального круга является переменной величиной, что должно быть справедливо и для эластичного полимерно-абразивного круга.

В работе В.А. Щеголева [260] отмечено, что при расчете сил взаимодействия эластичного абразивного круга (который представляет собой упругое основание с закрепленной на нем абразивной лентой) с деталью, учитывается сила сопротивления упругого основания, сила инерции в переносном движении, сила инерции в относительном движении и коэффициент приведения массы. К сожалению в данной работе, динамическая задача решалась в предположении, что основание круга является упругим. На самом деле, материал основания обладает упруго-вязкими свойствами, которые зависят от особенностей самого материала и от динамических характеристик процесса обработки. В работе [260] нет четкого пояснения о понятии коэффициента приведения массы и методе его определения.

В работе [242] приведены результаты исследований затрат мощности, необходимой для осуществления процесса обработки полимерно-абразивными дисковыми щетками деталей из конструкционных сталей 45 и 12X18H10T. Выявлено, что на изменение мощности обработки существенное влияние оказывают увеличение скорости резания, зернистости порошка абразивного модификатора волокна, радиальной деформации инструмента, вид обрабатываемого материала и применение СОТС. Показано, что увеличение скорости резания, зернистости и радиальной деформации инструмента способствует росту мощности обработки. Получены эмпирические зависимости, позволяющие аналитически определять значения мощности и ее составляющих в зависимости от технологических параметров процесса.

Авторы [174, 175, 176, 177, 266] в своих работах отмечают, что при обработке абразивно-полимерными щётками следует учитывать, что данный процесс связан не только с воздействием абразивных зерен, распределенных в волокне, на обрабатываемую поверхность, но и с ударным действием каждого волокна, соприкасающегося с ней. Это воздействие растёт с увеличением скорости вращения щётки и ограничивается прочностными свойствами волокна [266]. Следовательно, полимерная основа волокна оказывает амортизирующее воздействие на зерно, ударяющее по обрабатываемой поверхности. Это снижает режущие способности единичным зерном и щёткой в целом [266].

### ***Износостойкость инструмента***

Согласно [58], в зависимости от условий обработки изнашивание абразивных зерен происходит в виде:

- истирания кромок, приводящего к притуплению и возникновению на них площадок износа;
- поверхностного выкрашивания;
- объемного разрушения;
- вырывания зерен из связки.

Общая картина процессов износа полимеров описана в работе [312]. Отмечено, что вариации механических свойств полимеров существенно влияют на процесс износа.

В работах [19, 39] приведены результаты исследования износа лепестковых кругов. В отличие от многих видов эластичных инструментов на основе шлифовальной шкурки (бесконечные ленты, ленточные барабаны) при обработке лепестковыми кругами в контакте с обрабатываемой поверхностью находится не только рабочий слой, но и тканевое основание работающих кромок лепестков. При исследовании влияния технологических факторов на изнашивание лепестковых кругов в качестве единицы измерения принят износ шкурки ( $\text{мм}^2$ ) при снятии обрабатываемого материала в  $1 \text{ мм}^3$ .

Следует сделать вывод о том, что для эластичного абразивного инструмента проводилось очень мало исследований в области износостойкости и сил его взаимодействия с обраба-

тываемой поверхностью. В основном эти исследования касались инструментов на основе шлифовальной шкурки.

### 1.2.2 Физико-механические свойства

#### поверхностного слоя детали при резании абразивными зёрнами

В уравнениях взаимодействия единичного зерна с обрабатываемой поверхностью, физико-механические свойства материала (кроме известных модуля упругости и коэффициента Пуассона) выражаются пределом текучести на сдвиг  $K$  и коэффициентом пластического трения  $\mu_T$  [57].

Предел текучести на сдвиг, часто называемый постоянной пластичности, представляет собой интенсивность касательных напряжений. При плоском пластически деформированном состоянии, согласно условию пластичности Треска – Сен-Венана (условие постоянства максимального касательного напряжения) [249], его величина определяется как:

$$K = \sigma_T/2, \quad (1.1)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести при линейном пластически напряжённом состоянии.

При выполнении условия пластичности Мизеса-Губера (условие постоянства удельной энергии формоизменения) [249]:

$$K = \sigma_T/\sqrt{3}. \quad (1.2)$$

Однако, определяемое по формулам (1.1) и (1.2) значение  $K$  соответствует плоскому пластически деформированному состоянию. В реальных же условиях воздействия единичного зерна материал обрабатываемой детали находится в объёмном деформированном состоянии. Поэтому те допущения, которые были приняты при выводе уравнений воздействия единичного зерна на упруго-пластическое полупространство, могут быть компенсированы применением метода испытаний физико-механических свойств материала максимально приближённым к условиям взаимодействия с обрабатывающим зерном. При обработке эластичным абразивным инструментом взаимодействие единичных зёрен с обрабатываемым материалом происходит в очень тонком поверхностном слое. А.С. Ахматов [14] отмечает, что существуют различия в физических свойствах металла между его поверхностными слоями и объёмом. Даже если поверхность никогда не вступала во взаимодействие с внешней средой, ювенильная поверхность металла на границе с вакуумом должна иметь некоторые структурные особенности кристаллических решёток зёрен, а главное, должна являться носителем значительного неизрасходованного запаса свободной энергии и, следовательно, обладать особо высокой адсорбционной способностью.

Если же металл подвергается механической обработке, то свойства и структура его поверхностных слоёв коренным образом изменяются. Характер этих изменений зависит от исходных свойств металла, от метода механической обработки и её условий.

И.В. Крагельский [113, 114] считает, что верхние слои металла, находящиеся на границе металла и окружающей среды, имеют меньшую микротвёрдость, чем слои, лежащие непосредственно под поверхностным слоем, микротвёрдость которых достигает максимальных значений. Низкие значения микротвёрдости поверхностных слоёв объясняются особым состоянием этих слоёв и частично их разрыхлением и, в том числе, (согласно А.Ф. Иоффе), наличием системы микротрещин, которые возникают при образовании поверхности.

Однако, известны данные [40, 154, 205], свидетельствующие о барьерной роли приповерхностных слоёв в общем процессе микропластической деформации. Облегчённые условия зарождения и движения дислокаций вблизи поверхности на начальном этапе деформирования приводят к более высокой скорости и степени деформационного упрочнения испытываемого металла, что проявляется в существенном росте величины микротвёрдости с уменьшением глубины.

Поэтому о большей или меньшей прочности приповерхностного слоя по сравнению с объёмом следует говорить, исходя из конкретных условий деформации, типа среды, предистории исследуемого материала.

Глубина, на которую распространяются указанные изменения, может быть значительной и, как утверждается в [14, 40, 51, 113, 134, 205], доходить до нескольких микрометров. Во многих случаях обработки эластичным абразивным инструментом эта величина соизмерима с зоной пластической деформации и разрушения.

Дополнительно следует отметить, что металл, соприкасаясь с внешней средой адсорбирует атомы и молекулы этой среды и его поверхность несет на себе сложную систему адсорбционных слоёв. А.С. Ахматов [14] приводит следующую схему их расположения начиная от первичной объёмной структуры металла:

- зона деформированного металла,
- слой окислов металла,
- адсорбционный слой газов,
- адсорбционный слой воды,
- адсорбционный слой полярных молекул органического вещества (смазки).

Не учитывать рассмотренную особенность приповерхностного слоя и его роль в процессе взаимодействия зерна с обрабатываемой поверхностью нельзя, а использование констант механических характеристик, свойственных материалу в объёме, будет необоснованным и повлечёт к значительным погрешностям при расчётах. Однако, современное состояние науки по этому вопросу не позволяет количественно учесть эту особенность деформируемого слоя при разработке аналитических зависимостей.

В связи с изложенным, физико-механические свойства обрабатываемого материала должны определяться в поверхностном слое, толщина которого близка глубине проникновения пластической деформации при изучаемом способе обработки.

Одним из способов оценки механических свойств материалов является царапание (склерометрия). С 80-х годов XX века применение данного метода практически прекратилось. Это связано с появлением метода измерительного индентирования. Однако при измерениях в микро- и наномасштабе метод царапания имеет ряд преимуществ, обеспечивает более высокую точность и составляет достойную конкуренцию индентированию [52, 101, 237].

Сопrotивление материала царапанию – это характеристика материала интегрально определяющая способность его приповерхностного слоя противостоять направленному деформированию. При этом наиболее достоверные данные могут быть получены при условиях царапания, максимально приближенных к реальным условиям воздействия единичного выступа обрабатывающей частицы.

Для тонких финишных процессов обработки, каким является обработка полимерно-абразивным инструментом, целесообразно воспользоваться именно склерометрическим методом определения предела текучести на сдвиг (метод царапания).

Математическая модель взаимодействия единичного зерна с упруго-пластическим полупространством может быть использована для определения предела текучести на сдвиг материала:

$$K = \frac{T}{r_l^2 \cdot f_T} \text{ или } K = \frac{P}{r_l^2 \cdot f_P},$$

где  $T$  и  $P$  – тангенциальная и нормальная составляющие силы резания соответственно;

$r_l$  – радиус закругления вершины зерна или вершины индентора;

$f_T$  и  $f_P$  – коэффициенты, характеризующие условия царапания материала.

Установлено [57], что предел текучести различных материалов с упруго-пластическими свойствами по глубине царапины изменяется неодинаково. Например, медь и нержавеющая сталь почти не изменяют своих свойств, а латунь и сталь 10 на поверхности имеют более высокий предел текучести, чем в глубине.

А.П. Бабичевым [17] предлагается следующая формула для вычисления глубины внедрения единичного абразивного зерна в обрабатываемую поверхность:

$$h = \frac{P}{\pi \cdot H \cdot D},$$

где  $P$  – сила соударения,  $H$  – пластическая твердость обрабатываемого материала,  $D$  – диаметр частицы рабочей среды (или абразивного зерна).

При этом физико-механические свойства материала заготовки предлагается учитывать только пластической твердостью.

П.И. Ящерицыным [268] предлагается величину внедрения индентора в поверхность образца, а, следовательно, и глубину внедрения абразивных частиц в обрабатываемый материал, рассчитывать по выражению:

$$h = \frac{P_N}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot C \cdot \sigma_T},$$

где  $P_N$  – сила нагружения индентора,  $\rho$  – радиус при вершине индентора,  $C$  – поправочный коэффициент,  $\sigma_T$  – предел текучести материала.

Однако исследований, посвященных контактному взаимодействию полимерно-абразивных инструментов с обрабатываемой поверхностью в работах вышеуказанных авторов нет.

### ***Коэффициент пластического трения***

Контактное трение при пластическом деформировании имеет ряд существенных особенностей по сравнению с трением упругодеформируемых тел [57]:

- поверхность контакта деформируемого материала непрерывно обновляется, что сказывается на силах трения;
- непостоянство коэффициента трения (показателя трения) по координатам контактной поверхности;
- зависимость коэффициента трения от геометрических, кинематических и динамических условий деформирования.

Установлена зависимость [57] коэффициента трения от относительной глубины внедрения и соотношения нормальной и тангенциальной сил резания:

$$\mu_T = (1,62 \cdot \varepsilon_E^2 - 11,51 \cdot \varepsilon_E - 33,64) \cdot \chi^b + 0,558,$$

где  $\chi = f_p/f_T = P/T$ ;  $b = 365,4 - 375,7 \cdot \varepsilon_E^{0,00288}$ .

Исследования коэффициента трения при различных типах смазки показали, что его величина мало зависит от вида смазки. Сопоставление глубины царапины при получении её на стали Э06 со смазкой и без неё показывает, что при царапании всухую глубина царапины меньше, чем в присутствии смазки [57]. Это согласуется с данными работ [25, 117].

Следует добавить, что для особо тонких процессов взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемым материалом при обработке полимерно-абразивными инструментами, использование условия пластичности Мизеса-Губера (1.2) возможно, но с учетом экспериментального поправочного коэффициента  $K_{II}$ , учитывающего глубину внедрения абразивных зерен в обрабатываемый материал.

Таким образом, физико-механические свойства обрабатываемых материалов, полученные на основе справочных данных, для моделирования внедрения режущего микрорельефа полимерно-абразивных инструментов в обрабатываемую поверхность могут быть использова-

ны с большими допущениями, либо необходимо использование поправочных коэффициентов. Это подтверждается данными работ [37, 38].

### 1.2.3 Производительность процесса обработки

#### *Съём материала*

Согласно [57], съём при абразивной обработке происходит в процессе соударения абразивного зерна с деталью и включает в себя объём вытесненного в виде стружки и разрушенного материала при многократном пластическом и упругом деформировании (полидеформировании) в результате накладывающихся многочисленных ударов. Это подтверждается данными работы [189], согласно которой при абразивной обработке существенную роль играет пластическая деформация и изменение прочностных свойств обрабатываемого материала.

На интенсивность съёма за счёт полидеформирования влияют объём пластически- и упругодеформированного материала при действии единичного зерна, а также количество этих воздействий, приходящихся на единицу поверхности в единицу времени [57].

В результате многократного пластического деформирования обрабатываемый материал разрушается и происходит его отделение объёмом  $\Delta Q_{пл}$ .

Объём материала, разрушенного единичным зерном при его перемещении в тангенциальном направлении на  $\Delta x$ :

$$\Delta Q_{пл} = \frac{S_{деф} \cdot \Delta x}{n_n},$$

где  $S_{деф}$  – площадь деформированного материала;  $n_n$  – количество циклов пластического деформирования, необходимое для разрушения материала.

Объём упруго-деформированного материала представляет собой незначительную величину по сравнению с объёмами стружки и пластического деформирования [57].

Съём материала с единицы площади определится по формуле:

$$Q = (Q_c + Q_{пл}) \cdot T_o \cdot N_k + Q_{дон},$$

где  $N_k$  – количество актов взаимодействия за единицу времени на единице площади обрабатываемой поверхности;

$T_o$  – время обработки;

$Q_c$  – объём материала, вытесненного в виде стружки за один удар;

$Q_{пл}$  – объём материала, разрушенного в результате пластического полидеформирования, приходящегося на один удар;

$Q_{дон}$  – дополнительный объём материала при наложении химического, электрохимического, электроимпульсного и других процессов на основной механический (эта составляющая будет иметь место при совмещённых способах обработки).

Съем материала при обработке лепестковыми кругами по данным работ [58, 59, 84, 262, 285] происходит в процессе взаимодействия микрорельефа режущей поверхности с обрабатываемой поверхностью детали и включает в себя объем материала, вытесненного абразивными зернами в виде стружки, и объем материала, разрушенного в результате малоциклового усталости при пластическом деформировании оттесняемого зернами материала. За основу для расчета съема материала авторы [58, 59, 84, 262, 285] принимают модель взаимодействия единичного зерна с обрабатываемым материалом, рассмотренную в [118].

Съем материала с единицы площади для обработки лепестковым кругом определится по формуле [58]:

$$g = \left( g_c + \frac{g_{def.}}{n_n} \right) \cdot n \cdot \frac{N}{k} \cdot T_1,$$

где  $g_c$  – объем материала, вытесненного единичным лепестком в виде стружки, определяемый как суммарный для цикла всех его этапов;

$g_{def.}$  – объем пластически деформированного материала единичным лепестком за цикл обработки для всех его этапов;

$n_n$  – суммарное число циклов взаимодействия, необходимое для элементарного акта разрушения в результате малоциклового усталости, согласно [113, 114].

Съем материала единичным зерном при обработке эластичным абразивным инструментом автором работы [260] рассматривается из условия что материал, снятый с поверхности детали в зоне контакта должен разместиться в пространстве между зернами. В работе рассматривается оптимизация этого пространства. К сожалению, сведений о производительности процесса обработки по съему в целом, в работе [260] не приведено.

#### ***Снятие заусенцев и обработка кромок эластичными абразивными инструментами***

В работе [129] отмечено, что одним из перспективных методов скругления кромок является метод автоматизированной обработки абразивно-полимерными щетками и описаны несколько способов контроля формы кромки в поперечном сечении: способ проверки приложением шаблона к кромке [47, 296, 297]; сопоставление профиля кромки с координатной сеткой с применением микроскопов [95, 142, 202]; использование оптических датчиков на основе явлений интерференции, дифракции, отражения и преломления света.

В работе [174] проведен эксперимент, показавший эффективность применения цилиндрических абразивно-полимерных щеток для снятия заусенцев и полировки поверхностей при незначительном съеме металла.

Согласно [57], съем материала не является целью финишной обработки и связан со скруглением острых кромок и формированием поверхностного слоя. Процесс скругления ост-



рых кромок, как самостоятельная технологическая операция, полностью зависит от съема материала.

В работе [231] отмечено, что большую роль в улучшении эксплуатационных свойств деталей и увеличении их долговечности играет тщательное выполнение операций скругления острых кромок, так как эти элементы поверхностей являются концентраторами напряжений, в этих местах обычно образуются первичные усталостные трещины. Также согласно [231], устранение острых кромок путем образования фасок не всегда является достаточной мерой, а иногда даже приводит к ухудшению положения, поскольку при этом образуются две острые кромки. Поэтому, согласно [231], скругление кромок по радиусу является наилучшим конструктивным выполнением мест сопряжения различных элементов поверхностей детали. Авторами [231] предложено скруглять острые кромки гидроабразивным методом.

Исследованиями радиусов скругления острых кромок плоских образцов 2,2x12x65 мм из сплава В95Т при вибрационной обработке в свободном состоянии с изменением амплитуды и частоты колебаний, грануляции абразива (бой метлахской плитки) автором [57] установлено, что их значения пропорциональны удельному съему материала независимо от параметра, вызвавшего изменение съема. Радиус скругления острых кромок зависит от интенсивности съема, конструкции детали и способа обработки. Следовательно, разработанная математическая модель съема будет являться основой в расчете времени обработки, необходимого для формирования требуемого радиуса скругления.

Авторами [307] для удаления заусенцев, скругления острых кромок, полировки исследован такой процесс как обработка абразивным потоком (AFM).

В целом, на основании проведенного анализа можно констатировать, что в приведенных работах отсутствуют методики определения показателей количественной оценки параметров, определяющих производительность процесса и качество обработки поверхностей на кромках. Отсутствуют также теоретические положения, позволяющие прогнозировать численные значения данных показателей в зависимости от свойств обрабатываемого материала и характеристик полимерно-абразивных инструментов, а также режимных параметров обработки.

#### **1.2.4 Качество обработанной поверхности**

##### ***Шероховатость обработанной поверхности***

Вопросам формирования поверхностного слоя и качества обработанной поверхности при различных видах механической обработки посвящено множество работ отечественных и зарубежных исследователей [1, 57, 58, 89, 110, 119, 120, 121, 122, 190, 193, 195, 278, 302, 303, 310, 333, 336, 340, 341, 347, 350 и др.].

Независимо от исходного состояния поверхности в процессе обработки формируется *достижимая шероховатость*, параметры которой зависят от условий обработки и свойств обрабатываемого материала [15, 17, 57, 58]. Если шероховатость поверхности до обработки была меньше

достижимой, то в процессе её она увеличивается; если больше, то уменьшается до значения достижимой. Таким образом, в случае прекращения процесса обработки до получения достижимой шероховатости, т.е. когда фактически снятый с единицы площади объём материала и время обработки меньше времени, необходимого для формирования достижимой шероховатости, параметры шероховатости такой поверхности будут иметь промежуточные значения между исходной и достижимой.

Высотные параметры достижимой шероховатости  $Ra$ ,  $Rz$  и  $Rmax$  [45] зависят от максимальной  $y^I_{max} = y_{max} - \xi_I \cdot \sigma_s$  и средней  $y_{Emax}$  глубины внедрения микровыступов абразивного зерна в материал детали, рассчитываемых в математической модели взаимодействия зерна с обрабатываемой деталью.

Здесь  $\xi_I$  – относительное сближение контактирующих поверхностей  $\xi_I = y/\sigma_s$ ,  
 $\sigma_s$  – среднеквадратичное отклонение эквивалентного микрорельефа.

В работах [58, 59, 262] приведены результаты экспериментальных исследований шероховатости обработанной поверхности при обработке деталей лепестковыми кругами. Установлено, что шероховатость поверхности в поперечном направлении относительно подачи больше, чем в продольном. Авторы [58, 59, 262] объясняют это наличием отдельно выступающих зерен шкурки, которые при вращении круга создают значительные продольные риски.

По полученным экспериментальным данным авторами [58, 59, 262] сделан вывод: при обработке лепестковыми кругами алюминиевого сплава В95пчТ2 основное влияние на параметры шероховатости обработанной поверхности оказывают зернистость лепестков, частота вращения круга и деформация в радиальном направлении. Авторами [58, 59, 262] установлено, что изменение продольной подачи при обработке образцов не оказало на шероховатость поверхности никакого влияния.

Авторами [104] разработана методика моделирования шлифованной поверхности, которая позволяет учитывать особенности структурных характеристик используемого инструмента и на основе анализа работы единичного абразивного зерна, прогнозировать параметры шероховатости с повышенной точностью.

В работах [238, 239, 240, 241, 242, 243] приведены результаты экспериментального исследования влияния основных технологических факторов обработки и конструктивных характеристик дисковых абразивных щеток на шероховатость поверхности коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т и сплава АМг5. Установлено, что за счет изменения скорости резания, величины подачи, зернистости абразива, количества ходов, величины радиальной деформации инструмента и его разворота относительно направления подачи детали можно обеспечить получение заданных значений параметра  $Ra$  шероховатости в достаточно широком диапазоне значений (0,23–2,33 мкм).

Действительно, эластичные абразивные инструменты позволяют, как правило, обеспе-

чить меньшую шероховатость обработанной поверхности детали, чем в случае обработки жестким инструментом тех же характеристик [259].

Объясняется это тем, что поверхность резания будет тем более сглажена, чем большее число элементарных режущих профилей участвует в ее формировании [132, 249, 278]. Эластичные инструменты имеют значительно бóльшие зоны контакта с обрабатываемой поверхностью, чем жесткие. Поэтому количество режущих профилей, проходящих через данное сечение детали оказывается бóльшим.

В работе [260] проведены как теоретические, так и экспериментальные исследования микрогеометрии поверхности, обработанной эластичным абразивным кругом. Анализ корреляционных функций и спектральных плотностей поверхностей показал, что поверхности, обработанные эластичными шлифовальными кругами значительно более однородны, чем поверхности после обработки жестким кругом.

Микрорельеф поверхности при обработке абразивным инструментом формируется микрорезанием и пластическим оттеснением материала микровыступами ударяющихся по обрабатываемой поверхности абразивных зерен [57].

Так же как и для определения микрогеометрии режущей поверхности, микрорельеф обработанной поверхности может быть описан нормальным стационарным случайным процессом. Согласно [203], обработка профилограмм при этом существенно упрощается. Достаточно найти среднее квадратичное отклонение  $\sigma$  и особые точки (число нулей  $n(0)$ , т.е. пересечений со средней линией, и число максимумов  $m$ ), чтобы определить параметры микрорельефа, а именно: среднеарифметическое отклонение, максимальную высоту, относительную опорную длину профиля, радиус закругления вершин, угол профиля, количество выступов, одновременно находящихся в контакте, среднюю высоту неровностей на заданном уровне и т.д.

В результате анализа перечисленных публикаций, сделан вывод о том, что теоретические методики определения показателей количественной оценки параметров, определяющих качество обработки поверхностей и кромок деталей из алюминиевых и титановых сплавов полимерно-абразивными инструментами на сегодняшний день полностью отсутствуют.

### ***Остаточные напряжения, возникающие в поверхностном слое деталей после механической обработки***

Во всех твердых телах имеются остаточные напряжения, т.е. напряжения при отсутствии внешних воздействий на твердое тело (силовых, тепловых, магнитных, радиационных и др.). Технологические остаточные напряжения всегда возникают или целенаправленно формируются в ходе технологического процесса изготовления детали и ее ремонта [153]. Различают остаточные напряжения первого рода, охватывающие большую часть заготовки; напряжения второго рода, образующиеся в микроскопических объемах, - зернах, кристаллах; напряжения третьего рода, характерные для ячеек кристаллической решетки [228].

Механизм образования остаточных напряжений приближенно можно представить следующим образом [146]:

1) *под действием силы трения* происходит пластическое растяжение верхних слоев обработанной детали, поэтому нижние слои подвергаются упругой деформации растяжения. После прохода инструмента нижние слои стремятся сжаться, но этому препятствуют верхние слои. В результате, в нижних слоях останутся напряжения растяжения, а в верхних слоях возникнут уравновешивающие их остаточные напряжения сжатия:

2) *под действием тепла*, возникающего в процессе резания, верхние слои нагреваются до высокой температуры. После прекращения резания происходит быстрое охлаждение этих слоев, сопровождающееся их сжатием, но сжатию верхних слоев препятствуют нижние слои, оставшиеся холодными. В результате, в верхних слоях возникают остаточные напряжения растяжения, а в нижних – уравновешивающие их напряжения сжатия.

Таким образом, в результате деформаций в верхних слоях образуются напряжения сжатия, а в результате тепла – напряжения растяжения. В зависимости от условий резания преобладают те или другие остаточные напряжения [146].

Остаточные напряжения оказывают существенное влияние на многие эксплуатационные свойства деталей (сопротивление усталости, коррозионную усталость, коррозионное растрескивание под напряжением и др.), а также вызывают деформации деталей при их изготовлении и эксплуатации (в результате релаксации) [153].

Коллективом авторов [143] отмечено, что при нерациональных условиях абразивной обработки в поверхностном слое титановых и никелевых сплавов могут возникать различные дефекты, основными из которых являются: прижоги, адгезионные налипы, глубокие риски, кратеры, слой с изменной микроструктурой и химсоставом, микротрещины, остаточные напряжения растяжения. Эти дефекты могут снижать предел выносливости на 14-20% [143].

На этапе финишных технологических операций в поверхностных слоях желательно создавать сжимающие остаточные напряжения [250].

Основными методами определения остаточных напряжений являются механические и рентгеновские. Весьма перспективными для промышленного применения являются электрофизические методы, при которых остаточные напряжения определяются по изменению электромагнитных свойств поверхностного слоя [156].

В авиационном производстве ведётся активный поиск неразрушающего метода определения остаточных напряжений [53]. Рентгеновский метод определения остаточных напряжений позволяет непосредственно измерять деформации кристаллической решетки при воздействии напряжений [156]. Основное преимущество рентгеновского метода состоит в том, что остаточные напряжения определяются без разрушения детали. Метод может быть использован не только для исследования, но и для контроля технологического процесса. Рентгеновский метод не лишен недостатков: напряжения определяются только в поверхностном слое, точность опреде-

ления сравнительно невысока [156]. Однако возможность определения остаточных напряжений без разрушения детали делает рентгеновский метод чрезвычайно перспективным [156].

Из-за высокой стоимости заготовок, на производственных объединениях не определяют остаточные напряжения, поэтому существует необходимость в недорогом неразрушающем и точном методе определения остаточных напряжений [10]. Одним из способов достижения этого результата является математическое моделирование формирования остаточных напряжений и, следовательно, составление методики прогнозирования остаточных напряжений и деформаций [10].

В работе [130] рассмотрен процесс формирования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при ультразвуковой упрочняющей финишной обработке. Представлена техника моделирования остаточных напряжений после упрочнения поверхности инструментом сферической формы с использованием метода конечных элементов.

Метод конечных элементов с использованием программных средств компьютерного инженерного анализа широко применяется в современном производстве и позволяет значительно облегчить определение остаточных напряжений [250].

Однако нельзя не отметить тот факт, что обработка полимерно-абразивными инструментами имеет ряд специфических особенностей, в частности:

- многообразие факторов (которые чаще представляют собой случайные величины), влияющих на процесс обработки;
- участие в процессе обработки многочисленных вершин зерен при очень малой и неопределенной глубине внедрения;
- наличие взаимодействия нескольких сред (абразивные зерна, полимерная связка, очень тонкий, разупрочненный поверхностный слой обрабатываемого материала, существенно отличающийся по своим физико-механическим свойствам от основной массы материала);
- наложение динамически изменяющихся температурных полей.

В связи с изложенным, применение метода конечных элементов с использованием программных средств компьютерного инженерного анализа для рассматриваемого метода обработки будет иметь существенные погрешности для практического прогнозирования результатов обработки и в целом представляется затруднительным.

В то же время всестороннее исследование остаточных напряжений при обработке авиационных деталей полимерно-абразивными инструментами крайне необходимы для науки и практики с целью изучения возможности применения рассматриваемого метода обработки в реальных производственных условиях. Необходимо разработать теоретические подходы к определению зависимостей формирования остаточных напряжений от применяемого инструмента и режимных параметров обработки. Все аналитические расчеты необходимо подтвердить экспериментально. Учитывая высокую стоимость изделий из авиационных сплавов, для экспериментальных исследований предпочтительными являются методы неразрушающего контроля остаточных напряжений.

### **1.2.5 Температура при контактном взаимодействии абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью**

Любой процесс обработки характеризуется выделением тепла, которое уходит в стружку, обрабатываемую деталь и окружающую среду [187].

Температура, возникающая в процессе механической обработки, оказывает существенное влияние на производительность процесса обработки, качество изделий, а также износ инструмента [201].

Исследованиями теплофизических процессов при абразивной обработке посвящено множество работ отечественных и зарубежных исследователей [88, 126, 147, 158, 187, 200, 201, 209, 217, 264, 265, 308, 316 и др]. При абразивной обработке тепловой импульс вносится единичным источником (абразивным зерном). Поэтому при моделировании тепловых явлений при абразивной обработке подавляющее большинство авторов [60, 147, 158, 201, 308, 316 и др.] применяют метод источников.

Авторами [238, 239, 240, 241, 242] исследованы расчетные значения температуры, глубины теплового воздействия, оценен температурный режим обработки без охлаждения плоских поверхностей деталей из конструкционных сталей 45, 12Х18Н10Т и алюминиевого сплава АМг5 при обработке дисковыми полимерно-абразивными щетками. Установлено влияние кинематических параметров процесса (скорости резания, подачи инструмента) и теплофизических характеристик деталей на температуру материала в зоне обработки и характер распределения температуры в приповерхностной зоне. Разработана модель тепловых процессов при шлифовании тел вращения и плоских поверхностей дисковыми полимерно-абразивными щетками.

В работах [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 137] изучены вопросы механизма работы полимерно-абразивных щеток, энергетических и тепловых процессов, протекающих во время работы, которые оказывают решающее влияние на срок эксплуатации полимерно-абразивной щетки. В результате проведенных исследований получены аналитические зависимости, позволяющие определить температуру полимерного волокна при его контактном взаимодействии с поверхностью, которая подвергается обработке.

Результаты исследований, приведенных в [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 137, 238, 239, 240, 241, 242] выполнены с использованием полимерно-абразивных щеток из абразивосодержащих нитей. Поскольку ворсины цельнолитых щеток, на которых планируется проведение исследований, существенно отличаются по форме и поперечному сечению от абразивосодержащих нитей, результаты исследований, приведенные в перечисленных публикациях, для цельнолитых щеток вряд ли могут быть приемлемы. Также особый интерес представляют исследования предполагаемых к применению в настоящей работе инструментов с полимерной связкой Scotch-Brite. Данные инструменты в работах других авторов не исследовались в принципе.

Необходимо отметить, что закалка и старение авиационных сплавов производится при температурах, существенно превышающих температуру плавления полимерных материалов. В связи с этим, для теоретических расчетов целесообразно применение метода источников, как наиболее простого и удовлетворительно описывающего процессы теплообразования при абразивной обработке. Более точный анализ тепловых процессов, который можно реализовать, например, с использованием численных методов [209, 253, 276], в рамках решаемых задач не имеет смысла.

Для случая обработки поверхности полимерно-абразивным инструментом, вполне приемлемо использование теоретических подходов, предложенных авторами [60, 201]. Все известные зависимости, приведенные в данных работах, необходимо модернизировать с учетом исследований особенностей взаимодействия режущего микрорельефа и сил взаимодействия с обрабатываемой поверхностью для предполагаемых к исследованию абразивных кругов на полимерной связке Scotch-Brite, а также цельнолитых полимерно-абразивных щеток (радиальных и торцевых).

### **1.3 Инструментальное и станочное обеспечение финишной обработки деталей**

#### **1.3.1 Специальное оборудование для обработки полимерно-абразивными инструментами**

В настоящее время большое количество зарубежных фирм выпускает специальное оборудование для финишной обработки деталей, в том числе с применением полимерно-абразивного инструмента.

Например, фирма Ficer (Великобритания) предлагает станки Ernst Pluto/Titan [233, 293] для удаления грата, окалины и заусенцев на кромках, в том числе стальных панелей, разрезаемых пламенными или плазменными горелками. Обработка осуществляется высокоэластичным шлифовальным вальцем, предназначенным для удаления заусенцев и окалины, обильно образующихся после вырубки, плазменной, газовой и лазерной резки.

Фирма LissMac (Германия) [315] выпускает станки серий SBM-M, SBM-XL, SBM-XS и др., инструменты которых (круглые щетки) удаляют заусенцы и скругляют кромки всех внутренних и внешних поверхностей обрабатываемых деталей с двух сторон за один проход.

Компанией NS (Maquinas Industriais) (Португалия) [157, 321] предлагаются зачистные станки серии DM, которые предназначены для обработки листового металла и деталей из него, изготовленных штамповкой, резкой, лазерной резкой или другим типом тепловой резки. Чистовая обработка, удаление заусенцев и скругление краев достигается с помощью различных комбинаций: комплекс абразивных головок, блок пересекающихся абразивных лент, блок абразивных щеток.

Компания Fladder (Дания) [295] разработала целую линейку оборудования семейства GYRO, позволяющего пользователям автоматизировать процесс очистки и зачистки деталей с использованием эластичных абразивных щеток. Установка Fladder 400/Gyro применяется для зачистки поверхностей и скругления острых кромок в условиях Иркутского авиационного завода – филиала ПАО «Научно-производственная корпорация «Иркут» [255, 256, 257].

Автор работы [3] также рассмотрел практические вопросы удаления заусенцев абразивными щетками и отметил, что такая операция легко поддается автоматизации, в т. ч. на станках с ЧПУ.

Международный концерн Kuka [139] предлагает серию промышленных роботов, предназначенных для решения различных производственных задач. В частности, данные роботы могут использоваться и для финишной обработки заготовок деталей, что подтверждается на примере робота KUKA KR210 R2700 extra. Данный промышленный робот в настоящее время исследуется коллективом авторов [96, 97, 208, 255, 256, 257, 334]. Представлена подготовка к проекту по созданию робототехнического комплекса для скругления острых кромок удаления заусенцев после фрезерования деталей. Возможности автоматического скругления углов посредством промышленного робота и разработка системы компенсации ошибок положения относительно заданного направления движения инструмента рассмотрены также в публикации [318].

Подобное специальное оборудование, предназначенное для финишной обработки, активно приобретается отечественными предприятиями, так как позволяет существенно повысить качество и производительность труда по сравнению с ручной обработкой.

В условиях Иркутского авиационного завода – филиала ПАО «Научно-производственная корпорация «Иркут», авторами работ [255, 256, 257] также проведен сравнительный анализ различных видов финишной обработки: виброабразивная обработка, обработка эластичными абразивными щетками с применением щеточной стационарной установки Fladder 400/Gyro, обработка с использованием промышленного робота Kuka KR210 R2700 extra. Сделан вывод, что освоение и внедрение вышеописанных современных технологических решений обеспечивает значительный технико-экономический эффект и позволит Иркутскому авиационному заводу снизить трудоемкость операций финишной обработки деталей в 2-3 раза. Также разработан и протестирован программный модуль, назначающий оптимальные режимы для щеточной стационарной установки Fladder 400/Gyro [257]. Отмечено, что тестовое использование программного модуля при назначении режимов щеточной обработки деталей из алюминиевых сплавов самолета МС-21 в условиях Иркутского авиационного завода позволило снизить долю трудоемкости ручной доводки после щеточной обработки на 16%, оптимизировать процесс загрузки щеточной установки с учетом обрабатываемой номенклатуры деталей.



Следует отметить, что предлагаемое программное решение способно лишь назначать для определенной щеточной установки и определенного обрабатываемого материала подходящие режимы в целях обеспечения требуемого размера скругленной кромки.

Оборудования для обработки кромок на длинномерных деталях типа профилей в зарубежных и отечественных публикациях не обнаружено, что говорит о необходимости создания такого оборудования.

### 1.3.2 Эластичные полимерно-абразивные круги

Обработка эластичными инструментами, в отличие от обработки «жесткими» кругами, имеет ряд специфических особенностей. Такие инструменты не устанавливаются на определенную глубину резания, а необходимые условия для работы отдельных зерен создаются за счет предварительного их нагружения. При этом деформируется основание инструмента, прижимаемого к обрабатываемой поверхности [59].

Закрепление абразива в упругой связке коренным образом изменяет характер его взаимодействия с обрабатываемым материалом [59]:

- амортизируется удар зерна о материал, в результате чего повышается его стойкость;
- исключается микрорастрескивание поверхностного слоя хрупких материалов;
- создаются условия для увеличения количества одновременно работающих зерен;
- уменьшается скорость засаливания рабочей поверхности инструмента;
- улучшается процесс самоочистки инструмента;
- увеличивается время взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью.

В результате воздействия перечисленных факторов повышается качество обработанной поверхности.

Особенность работы зерна на упругом основании заключается в том, что зерно имеет возможность «отжиматься» во время работы. При жестком же закреплении траектория движения зерна определяется только кинематикой процесса. Каждое абразивное зерно имеет возможность перемещаться как при деформации всей массы связки, так при деформации малых ее объемов, непосредственно примыкающих к зерну [59].

Существует множество технологий производства эластичных абразивных кругов. При работе эластичными абразивными кругами может использоваться универсальное оборудование [138].

Для шлифования и полирования применяются эластичные круги различных типов и конструкций [58, 59]. Например:

- круги с закрепленными на их поверхностях абразивными зёрнами;
- круги с использованием шлифовальной шкурки, в том числе лепестковые [100, 162, 163, 164, 165, 167, 168, 169, 172 и др.];

- фибровые диски [44, 48];
- круги из нетканого абразивного материала [13, 152, 170, 188, 196, 260, 270 и др.];
- эластичный инструмент на порошковой связке [152, 260];
- эластичный абразивный инструмент на основе вспененного полиуритана [108];
- эластичный абразивный инструмент на сизалевой основе [261];
- вулканические круги [171].

Изготовлением эластичных абразивных кругов занято большое количество компаний, в основном зарубежных, например: *HERMES* [261], *3M (Minnesota Mining and Manufacturing Company)* [270], *C.Hilzinger-Thum* [298], *Eisenblaetter* [290], *Lippert Unipol* [196], *Norton Co* и др.

Авторами [313] спроектирован, разработан и насыщен частицами карбида кремния (SiC) эластичный абразивный инструмент на основе микропористого силикагеля.

В России запатентована связка для гибкого абразивного инструмента [161], которая содержит поливинилхлорид, синтетический каучук с отвердителем, растворитель. К сожалению, следует констатировать, что большинство подобных технических решений не доведено до серийного производства и на сегодняшний день отечественной промышленностью выпускается крайне мало эластичных абразивных инструментов.

Авторами [193, 195] проведены исследования обработки зубчатых колес эластичным полимерно-абразивным кругом и установлено, что данный инструмент не оставляет на поверхности прижогов и не провоцирует появление шлифовочных трещин.

С подробной классификацией эластичных инструментов, применяемых в различных отраслях промышленности можно ознакомиться в работах [58, 59].

### 1.3.3 Полимерно-абразивные щетки

Вращающиеся щетки широко используются в промышленности для выполнения самых разнообразных операций: очистки поверхностей от окалины, ржавчины, краски, снятия заусенцев, скругления острых кромок, полирования и упрочнения поверхностей с целью повышения износостойкости и усталостной прочности деталей машин [138].

Основными характеристиками щетки являются: тип щетки, материал и диаметр ворсинок, свободная длина ворса, плотность рабочей части, диаметр и ширина щетки, форма и размеры посадочного места.

Подробная классификация щеток приведена в работе [59].

*Плотность рабочей части* определяется количеством ворсин на единицу поверхности. Высокая плотность рабочей части обеспечивает лучшую обработку поверхности и более высокую режущую способность, которая требуется, например, при работах, связанных с удалением заусенцев [157]. Меньшая плотность рабочей части дает более высокую эластичность, когда отдельные ворсины работают по принципу «плетки» [157].

Согласно [59], ворс щеток может изготавливаться из таких материалов как: *натуральная свиная щетина; натуральный волос; фибра; хлопчатобумажная пряжа (корд); растительные волокна; синтетическая щетина; полиамиды.*

### ***Радиальные эластичные абразивные щетки***

Обработка щетками производится на универсальном металлорежущем и деревообрабатывающем оборудовании с использованием шлифовальных машин, дреелей и на специальных станках. Например, для удаления заусенцев, по данным [326], используется робот с 5-ю степенями свободы, на механической руке которого установлена полимерно-абразивная щетка.

Вопросам обработки изделий щетками посвящены ряд работ [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 58, 87, 119, 120, 121, 123, 124, 125, 129, 137, 176, 193, 195, 216, 255, 256, 260, 266, 317, 320, 326 и др.].

Щетки являются более гибким инструментом, чем эластичные абразивные круги. Отдельные ворсины щеток способны проникать во впадины микропрофиля поверхности, а, следовательно, не только удалять микронеровности, но и скруглять дно их впадин. При скруглении кромок и устранении царапин щетками, удается рассредоточить напряжения, концентрирующиеся на острых гранях, что предотвращает образование трещин на поверхностях деталей во время их эксплуатации и повышает усталостную прочность металла.

Также следует добавить, что полимерно-абразивные щетки способны практически не "засаливаться" при большом объеме снимаемого материала, это означает, что качество и производительность обработки практически не изменяются до момента полного изнашивания щетки [236].

Согласно [59], независимо от материала ворса, дисковые щетки подразделяются по: плотности набивки ворса – большой, средней и малой плотности; ширине рабочей части – широкие, средние и узкие; расположению ворса – с радиальным, тангенциальным и свободным расположением ворсинок или пучков; характеру укладки ворса – непрерывная и пучками; способу изготовления – сплошные, собранные из единичных секций или из спирального набора; материалу ступицы – с металлической, деревянной, пластмассовой, резиновой ступицей или без нее.

Однако основным фактором, препятствующим широкому распространению обработки деталей щетками, является низкая производительность процесса. Для повышения производительности и качества обработанной поверхности щетки могут применяться с абразивными пастами (в том числе с алмазными и эльборовыми) и различными смазывающе-охлаждающими технологическими составами (СОТС).

Конструктивные разновидности радиальных щеток и их размеры очень разнообразны, что определяется использованием этих щеток для широкого круга работ [59].

Радиальные щетки выпускаются рядом компаний разных стран, например: 3M («*Minnesota Mining and Manufacturing Company*») (США) [270], *C.Hilzinger-Thum* (Германия) [298],

*ООО Меганпром – официальный представитель фирмы «August Ruggeberg PFERD–Werkzeuge»* (Германия) [155, 323], *OSBORN International* [157], *LIPPERT UNIPOL* (США) [196], *Friedrich August Picard* (Германия) [324], *Abtex Corporation* (Германия) [271] и другие.

### ***Торцевые полимерно-абразивные щетки***

Разновидности торцевых щеток подробно рассмотрены в работе [59]. Торцевые абразивсодержащие щетки с ворсинами из различных материалов широко применяются для обработки изделий из металлов, древесины, пластмасс и др. материалов.

В настоящее время такие щетки выпускаются в основном вышеперечисленными зарубежными компаниями.

Данный инструмент находит применение при обработке деталей с неровными краями, штампованных и фрезерованных деталей, удалении заусенцев, обработке листового металла, печатных плат, автомобильных деталей и рам, при производстве кухонных раковин, керамики, обработке древесины.

В качестве обрабатываемого материала используются например [58, 59]: полимерабразивный ворс; волокно агавы (отборное натуральное мексиканское волокно); ворс с абразивным покрытием LIPPRYLL®; сизалевый шнур (скрученный в спиральные нити). Диаметр ворса зависит от зернистости.

Более подробно классификация эластичных абразивных инструментов (кругов, щеток радиальных, торцевых), их виды, производители и способы изготовления рассмотрены в работах [58, 59].

Каждый из перечисленных инструментов, применительно к исследуемой финишной операции, обладает определенными достоинствами и недостатками. Поэтому для возможного их применения необходимо проводить соответствующие исследования.

## **Результаты и выводы по главе 1**

Из обзора опубликованных работ следует сделать вывод, что на сегодняшний день остаются не исследованными очень важные для теории и практики вопросы, а именно:

1. Отсутствуют методики определения показателей количественной оценки параметров, определяющих производительность процесса и качество обработки поверхностей и кромок полимерно-абразивными инструментами. Отсутствуют теоретические положения, позволяющие прогнозировать численные значения данных показателей в зависимости от свойств обрабатываемого материала и характеристик полимерно-абразивных инструментов, а также режимных параметров обработки. В связи с этим, возникает необходимость в проведении системного анализа технологической операции финишной обработки деталей полимерно-абразивными инструментами и поиске оптимизационных решений по выбору инструмента и назначению режимных параметров обработки.

2. Рассмотренные в [58, 128, 203] математические модели могут явиться лишь теоретической предпосылкой описания микрорельефа полимерно-абразивного инструмента. Для разработки теоретических основ процесса обработки полимерно-абразивными инструментами необходимо разработать теоретические положения, позволяющие прогнозировать производительность процесса обработки и качество обработанной поверхности в зависимости от физико-механических свойств материала инструмента и обрабатываемой детали, а также режимных параметров обработки. Данные теоретические положения возможно разработать только на основе математических моделей взаимодействия полимерно-абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью, которые, в свою очередь, могут быть созданы на базе особых исследований жесткости полимерно-абразивного инструмента, определения математического ожидания количества зерен, находящихся в контакте с обрабатываемым материалом и глубин их внедрения.

3. Анализ литературных источников показал, что исследований в области износостойкости полимерно-абразивных инструментов не проводилось. Чтобы решить комплексную проблему проектирования технологической операции финишной обработки и оптимизации данных процессов, необходимы серьезные исследования в области износостойкости полимерно-абразивных инструментов, как при зачистке поверхностей, так и при скруглении острых кромок, поскольку износ инструмента существенно влияет на себестоимость операции обработки в целом.

4. Остаточные напряжения, как один из показателей качества обработанной поверхности, могут оказывать существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей. Исследований в области формирования остаточных напряжений, возникающих после обработки полимерно-абразивными инструментами, не проводилось. Поэтому всесторонние исследования формирования остаточных напряжений в поверхностном слое крайне необходимы для науки и практики.

5. Одной из разновидностей операций финишной обработки деталей является скругление кромок. Обзор литературных источников показал, что в этой области есть отдельные публикации. Однако серьезных исследований в данной области на основе анализа опубликованных работ обнаружено не было. Поэтому, проведение экспериментальных исследований и создание совокупности математических моделей формирования скругленной кромки по размерам, форме и шероховатости, является актуальным при изучении скругления кромок полимерно-абразивными инструментами.

6. Публикации результатов исследований в области обработки деталей цельнолитыми полимерно-абразивными щетками (радиальными и торцевыми) в принципе отсутствуют. Поэтому для решения вопроса о возможности применения этой разновидности инструмента при финишной обработке авиационных деталей требуется провести комплекс особых, фундаментальных исследований.

7. Вопросам определения расхода электроэнергии (требуемой мощности при выборе оборудования) при финишной обработке деталей полимерно-абразивными инструментами посвящено

очень мало работ и, в основном, на экспериментальном уровне. Создание теоретических основ на основе математического моделирования процессов взаимодействия полимерно-абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью, позволит раскрыть сущность процесса обработки и определить не только требуемую мощность привода, но и расход электроэнергии, знания которого необходимо для оптимизации процесса, а также объяснить те явления, которые происходят при съеме материала, формировании шероховатости и остаточных напряжений в поверхностном слое.

8. Вопросам температуры, возникающей в зоне резания при обработке эластичными абразивными инструментами, посвящен ряд работ. Несмотря на хороший уровень изученности вопроса, отсутствуют исследования температуры в зоне резания при обработке цельнолитыми абразивными кругами на гибкой (полимерной) связке и цельнолитыми полимерно-абразивными щетками. Учитывая, что связка данных инструментов способна оплавляться при повышенных температурах, необходимость ее изучения (в рамках создания системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки) не отпадает.

8. Практически отсутствуют работы по оптимизации технологического процесса обработки полимерно-абразивными инструментами. Необходима разработка управляющей подсистемы, обеспечивающей оптимальный выбор инструмента и режимных параметров обработки с обоснованно выбранным критерием оптимизации. Также необходима разработка программного обеспечения, позволяющего эффективно управлять процессами финишной обработки: выбирать оптимальный инструмент и режимы обработки при зачистке поверхностей и скруглении кромок деталей.

Все вышеперечисленные обстоятельства сдерживают широкое внедрение рассматриваемого метода обработки в производство, не позволяют в полной мере использовать его широкие технологические возможности и не дают возможности для автоматизации/механизации рассматриваемых операций. В то же время, обработка полимерно-абразивными инструментами является весьма перспективным направлением. Это объясняется тем, что жесткими инструментами затруднительно зачищать тонкий поверхностный слой (особенно деталей из алюминиевых сплавов, широко применяемых в авиастроении) в связи с возможностью снятия определенного слоя материала и нарушения требуемой точности по размеру. При обработке абразивным инструментом на гибкой (полимерной) связке, вероятность этого сводится практически к нулю. При скруглении кромок жестким инструментом, с базированием детали по уже обработанным поверхностям, возникают затруднения с обеспечением требуемого размера (например  $0,5 \pm 0,2$  по ГОСТ 30893.1-2002) и точности кромки. Согласно ГОСТ 30893.1-2002, отклонение положения кромки относительно базовой поверхности может достигать  $\pm 1,5$  мм и даже  $\pm 6$  мм.

При обработке полимерно-абразивными инструментами (особенно щетками) вышеуказанных проблем можно легко избежать.

Как было отмечено ранее, проблема замены ручного труда на механизированный и автоматизированный в самолетостроении стоит достаточно остро и возникает, например, в следующих случаях: при изготовлении сложных, крупногабаритных, оребренных деталей самолета, после фрезерования на станках с ЧПУ могут проявляться дефекты (в переходах с одной поверхности на другую могут быть признаки волнистости; при обработке криволинейных поверхностей в двухмерном и трехмерном пространстве могут быть погрешности по форме в связи с тем, что даже при угловом шаге  $1,8^\circ$  шагового двигателя, линейный шаг может оказаться существенно больше требуемой шероховатости; случайные дефекты, связанные с фактическим состоянием фрезы и т.д.); при изготовлении длинномерных деталей типа профилей, после фрезерования требуется удаление заусенцев и скругление кромок. Все перечисленные дефекты требуют дополнительной обработки (отделочно-зачистные операции), которая в реальных условиях, как правило, выполняется вручную, на что тратится существенная трудоемкость, что, как следствие, приводит к повышению себестоимости продукции и снижению ее качества. Аналогичные случаи отмечаются и в других отраслях машиностроительного производства.

Таким образом, для развития нового научного направления в области абразивной обработки деталей полимерно-абразивными инструментами и технологического обеспечения качества поверхности на алюминиевых и титановых сплавах, а также эффективного внедрения данной разновидности обработки в производство, необходимо провести целый комплекс теоретических и экспериментальных исследований.

**С учетом всего вышеизложенного, целью работы** является разработка системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки авиационных деталей из алюминиевых и титановых сплавов полимерно-абразивными инструментами, с обеспечением требуемых показателей качества изделий при оптимальной производительности процесса обработки.

Для реализации вышеуказанной цели сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Проведение системного анализа технологической операции финишной обработки деталей полимерно-абразивными инструментами с целью выявления основных факторов, определяющих производительность процесса и качество обработки, а также выдвижения критериев оценки эффективности данной разновидности обработки;
2. Разработка теоретических положений, позволяющих проводить расчет показателей производительности процесса обработки и качества обработанной поверхности на основе математического моделирования взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью и информации о физико-механических свойствах обрабатываемого материала и характеристиках полимерно-абразивного инструмента.

3. Разработка теоретических математических моделей формирования остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое материала при обработке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами, а также проведение комплекса экспериментальных исследований, подтверждающего адекватность разработанных теоретических положений;
4. Получение совокупности эмпирических моделей, описывающих формирование скругленной кромки по форме и шероховатости в зависимости от режимных параметров обработки;
5. Решение задачи по вычислению целевой функции расхода электроэнергии, необходимой для проведения оптимизации финишной обработки деталей полимерно-абразивными инструментами, на основе разработки теоретических положений силового взаимодействия различного полимерно-абразивного инструмента с обрабатываемой плоской поверхностью и кромкой;
6. Экспериментальное исследование износостойкости различных полимерно-абразивных инструментов при зачистке поверхностей и скруглении острых кромок;
7. Разработка управляющих подсистем, обеспечивающих выбор оптимального инструмента и режимных параметров обработки, которые, в свою очередь, обеспечивают требуемое качество обработки при зачистке плоских поверхностей и скруглении острых кромок полимерно-абразивными инструментами при наибольшей производительности и наименьшей себестоимости выполнения операции.
8. Разработка программного обеспечения, позволяющего эффективно управлять процессами финишной обработки в производственных условиях: выбирать оптимальные полимерно-абразивный инструмент и режимные параметры обработки для зачистки поверхностей и скруглении кромок деталей;
9. Разработка и обоснование единой методики внедрения полимерно-абразивных инструментов с целью наиболее эффективной и успешной замены низкопроизводительного ручного труда на механизированный и автоматизированный.



## 2 Методологические основы исследований финишной обработки деталей машин полимерно-абразивными инструментами

### 2.1 Система оптимального управления проектированием операций финишной обработки и ее анализ

Финишная обработка деталей по зачистке поверхностей с целью уменьшения параметров шероховатости, устранения дефектов на поверхностном слое от предыдущей операции, удаления заусенцев и скругления кромок может эффективно осуществляться, как это отмечено в главе 1, вращающимися абразивными инструментами на гибкой (полимерной) связке.

Для изучения и эффективного применения системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки полимерно-абразивными инструментами (далее сокращенно: *система управления финишной обработкой* либо *система управления*) необходим системный подход по анализу заданной проблемной ситуации. При этом система, на основе которой будет решаться проблема, является сложным объектом, который имеет свои элементы и связи, функции и подфункции, в том числе существующие в надсистеме и окружающей среде.

В работе [145] дано следующее определение системы: «Для данной системы  $\Sigma$  пусть  $Q_p$  – произвольное множество, а функция  $R: Q_p \times X \rightarrow Y$  такова, что:

$$(x, y) \in \Sigma \leftrightarrow (\exists q)[R(q, x) = y].$$

Тогда  $Q_p$  – множество (глобальных) состояний, а его элементы – состояния (глобальные) системы  $\Sigma$ .

Введенная же в рассмотрение функция  $R$  носит название глобальной реакции системы  $\Sigma$ .

В связи с этим, решение задачи целесообразно проводить при моделировании анализируемого объекта в форме доступной для введения информации в систему управления (описание, математическое представление в виде аналитических и эмпирических зависимостей).

*Целью системного анализа* технологической операции является разработка единого методологического подхода к проектированию операции финишной обработки полимерно-абразивными инструментами по обеспечению требуемого качества (по шероховатости поверхностей, размерам и геометрической точности кромок) с оптимальной производительностью процесса при большом разнообразии конструкций инструментов (круги различной жесткости и зернистости, щетки радиальные и торцевые разнообразной конструкции и зернистости), форм обрабатываемых поверхностей (плоские и цилиндрические по-

верхности, кромки) и их взаимного расположения. При этом, *оптимальной производительностью* следует считать такую производительность процесса обработки, при которой обеспечиваются все требования НТД к качеству обработки при минимальной себестоимости выполнения операции и наличии ограничительных функций.

Процесс формирования обработанной поверхности необходимо рассматривать в континуальной среде, когда все точки пространства объемного твердого тела обладают одинаковыми физическими и химическими свойствами. Поэтому разрабатываемая система управления финишной обработкой будет являться *континуальной системой*, формируемой на основе непрерывных (континуальных) сред (физических полей), свойства которых определяются физикой процессов и в общем виде они выполняют операцию пространственно-временного функционального преобразования сигналов.

Любое научное исследование связано с установлением зависимости *воздействие – результат*. Воздействие подается на вход объекта (системы), результат фиксируется на выходе. При этом вся система управления должна быть построена на использовании формализованного представления динамической системы в пространстве состояний.

Создаваемая система управления должна обладать такими свойствами как *достижимость* (управляемость), *наблюдаемость* (восстанавливаемость) и *идентифицируемость*. Она должна состоять из входных параметров, пространства состояния и выходных параметров.

В пространстве состояний динамические системы могут быть представлены в виде непрерывных дифференциальных или разностных уравнений.

Исходя из сформулированного вербального определения системы, можно дать формализованное описание системы  $\Sigma$  в виде упорядоченной пары:

$$\Sigma = (A, B),$$

где  $A$  – множество элементов (подсистем), образующих систему;

$B$  – множество отношений между элементами множества  $A$ .

Строгая однозначная зависимость между состоянием входа  $X$  и состоянием выхода  $Y$  выражается при помощи переходной функции  $Y=R(X)$ ,

где  $R$  – оператор преобразования.

$R$ -преобразования в рассматриваемой системе управления могут быть как детерминированными в  $\Sigma_1$  – системах, так и стохастическими в  $\Sigma_2$  – системах. Системы  $\Sigma$  с входными и выходными параметрами относятся к *ориентированным* (направленным) системам.

Если рассматривать систему управления как обладающую иерархическими признаками, то такой системе присущи следующие характеристики:

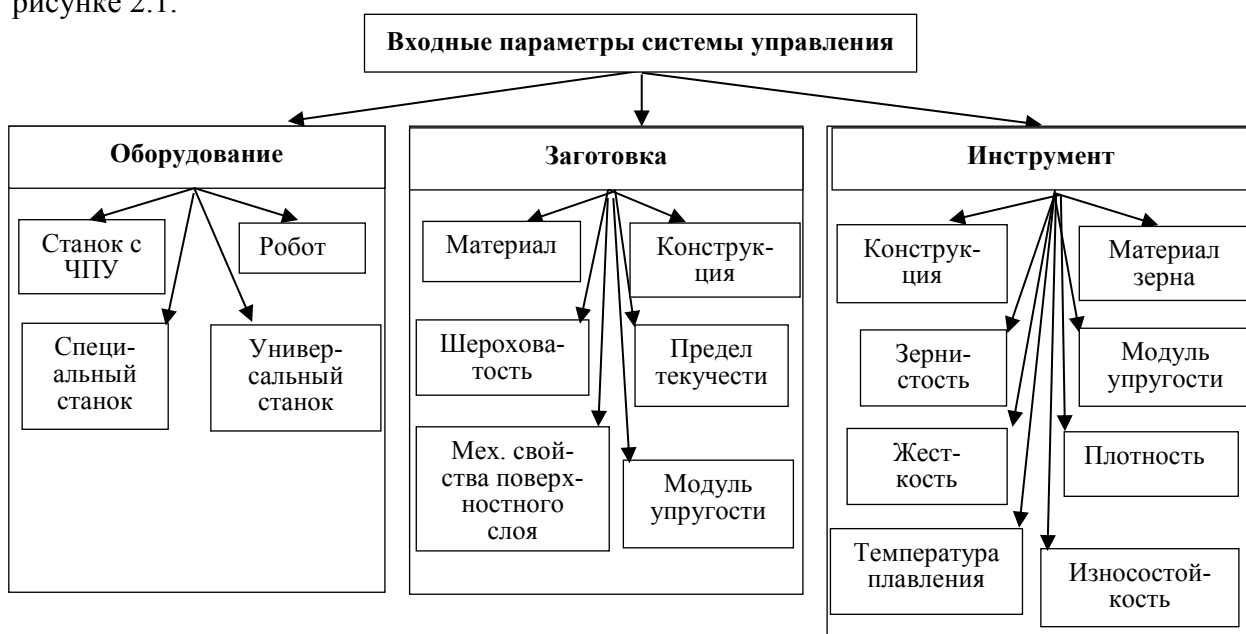
- последовательное вертикальное расположение подсистем, образующих данную систему;
- приоритет действий подсистем верхнего уровня;

- зависимость действий подсистем верхнего уровня от исполнения нижними уровнями своих функций.

Любая иерархия состоит из вертикально соподчиненных подсистем. Таким образом, вся система управления представляет собой некоторое семейство взаимодействующих между собой подсистем. Системы с входными и выходными данными относятся к *ориентированным* (направленным) системам.

Ход реального процесса определяется требованиями к поведению системы на верхнем уровне. Для нормального функционирования системы на данном уровне необходимо, чтобы все нижние уровни работали правильно. Чем ниже производится спуск по иерархии, тем более точным и детальным становится раскрытие системы, при подъеме же вверх все более ясным представляется смысл и значение всей системы в целом [145].

Воздействие на систему подается на вход и складывается из факторов, приведенных на рисунке 2.1.



**Рисунок 2.1. Входные параметры системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки**

Оборудование для данной операции выбирается по технологическим рекомендациям и в зависимости от наличия на производстве.

В качестве оборудования для зачистки поверхностей и скругления кромок могут использоваться: станки с ЧПУ, промышленные роботы с установленными на них электрошпинделями, специально спроектированные станки, универсальные станки (фрезерные, плоско-шлифовальные, расточные и т. п.), а также шлифмашинки электрические или пневматические.

Следует отметить, что шлифмашинка в системе управления участвовать не может, так как при работе на ней управлять оптимизированными режимными параметрами невозможно.

Однако, при отсутствии требуемого оборудования (производства бывают разного уровня оснащённости), применение полимерно-абразивных инструментов с использованием шлифмашинки взамен напильников, шарошек, шлифовальной шкурки и т. п. позволит повысить производительность труда и качество обработанной поверхности или кромки. Например, подобная полуручная обработка может дать неплохие результаты и в других сферах инженерной деятельности, например: кузовной ремонт автомобилей, строительство, деревообработка и т.д.

*Заготовка* характеризуется конструкцией (сочетание обрабатываемых поверхностей, их доступность для выполнения операции), материалом, из которого она изготовлена, и его свойствами (предел текучести, модуль упругости первого рода и механические свойства поверхностного слоя), а также теми операциями, которые предусмотрено выполнить (зачистка поверхностей, удаление заусенцев, скругление кромок) в соответствии с технологией изготовления детали.

*Инструмент* (эластичные полимерно-абразивные круги, радиальные и торцевые полимерно-абразивные щетки различной конструкции) назначается в зависимости от выполняемой операции в соответствии с технологическими рекомендациями и характеризуется конструкцией инструмента; механическими свойствами материала связки, насыщенного абразивным зерном: модулем упругости первого рода, жесткостью, плотностью (в дальнейшем «модуль упругости», «жесткость», «плотность»); материалом зерна; зернистостью; температурой плавления связки инструмента и износостойкостью.

### **2.1.1 Система оптимального управления проектированием операций финишной обработки**

Система оптимального управления проектированием операций финишной обработки относится к сложной системе. Архитектура такой системы [145] складывается как из ее компонентов, так и из иерархических отношений между ними. Ее иерархическая структура состоит из взаимосвязанных подсистем, которые, в свою очередь, также разделены на подсистемы.

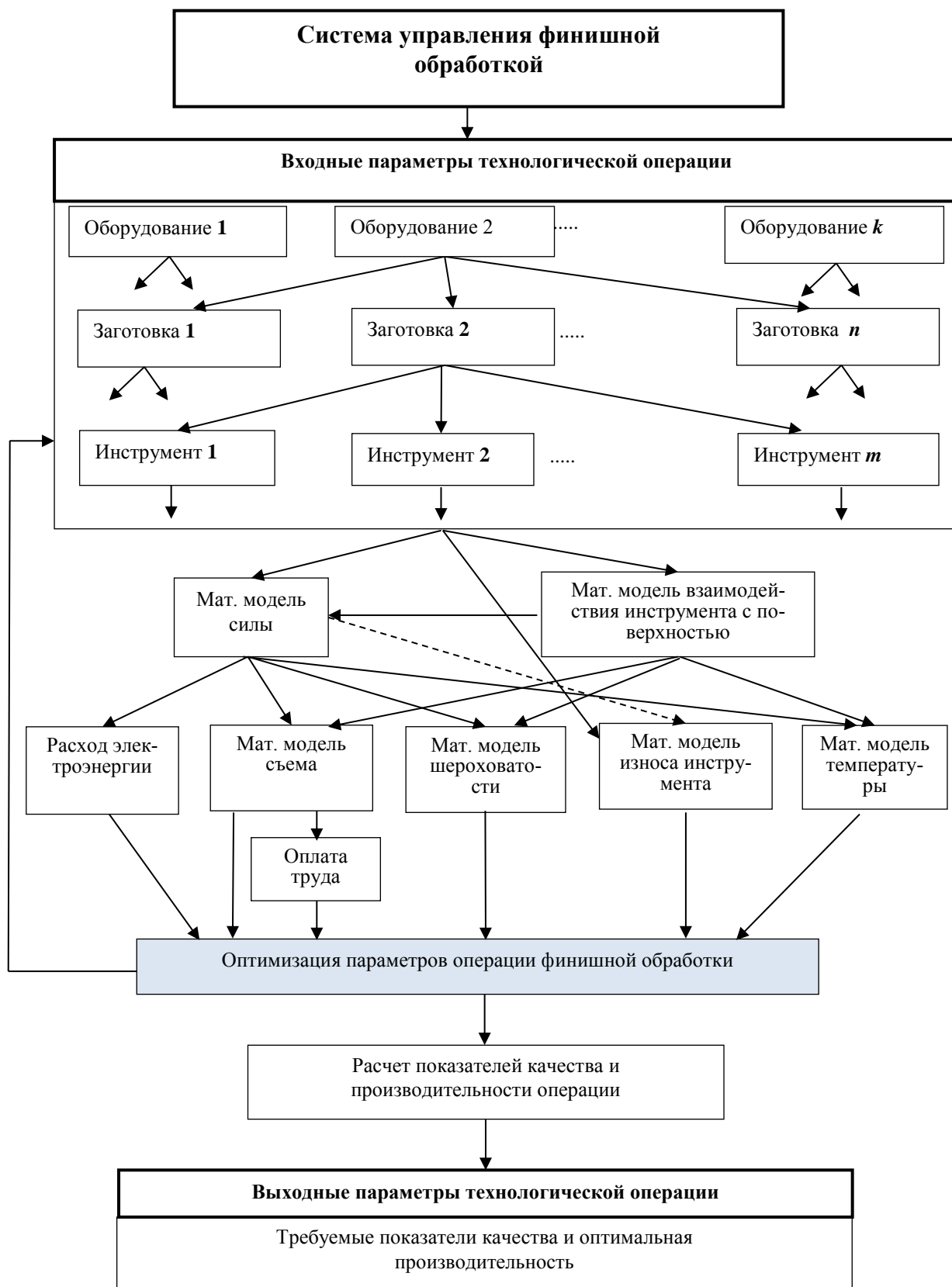
На рисунке 2.2 приведена схема системы управления проектированием операций финишной обработки.

Анализ системы заключается в функциональном, морфологическом и информационном ее описании, совокупность которых позволяет отразить главные свойства системы.

#### ***Функциональное описание системы***

*Функциональное описание* исходит из того, что всякая система выполняет некоторые функции, отражающие ее параметры, процессы и иерархию. Функционал, количе-

ственно или качественно описывающий деятельность (действие) системы, называют *функционалом эффективности*.



**Рисунок 2.2 – Система оптимального управления проектированием операций финишной обработки**

Примем, что система  $\Sigma$  выполняет  $N$  функций:  $1, 2, \Sigma_i, \dots, N$ , зависящих от  $n$ -процессов  $F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n$ . Эффективность выполнения  $s$ -й функции можно представить в следующем виде:

$$\mathcal{E}_s = \mathcal{E}_s(s) = \mathcal{E}(F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n) = \mathcal{E}_s(\{F_{ij}\}), i=1 \dots n, s=1 \dots N.$$

Общая эффективность системы есть вектор-функционал  $\mathcal{E} = \{\mathcal{E}_s\}$ .

Многоуровневая иерархическая структура, к которой относится рассматриваемая система управления финишной обработкой, характеризуется следующими признаками:

- последовательное вертикальное расположение подсистем, образующих данную систему;
- приоритет действий подсистем верхнего уровня;
- зависимость действий подсистем верхнего от выполнения нижними уровнями своих функций.

Таким образом, вся система представляет собой некоторое семейство взаимодействующих между собой подсистем. К высшему уровню относится собственно *система управления проектированием операций финишной обработки*.

В приведенной на рисунке 2.2 схеме *входными* параметрами (*подсистема второго уровня*) являются: оборудование, заготовка и инструмент, представленные на рисунке 2.1.

При наличии нескольких конкурирующих инструментов выбор оптимального инструмента осуществляется в управляющей подсистеме «Оптимизация параметров операции финишной обработки».

Информация по входным параметрам поступает в *подсистемы третьего уровня*: «Математическая модель силы» и «Математическая модель взаимодействия инструмента с поверхностью».

Силы взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью влияют на съем (производительность процесса), шероховатость обработанной поверхности, температуру в зоне резания, износ инструмента и мощность электродвигателя привода оборудования.

«Математическая модель взаимодействия инструмента с поверхностью» определяется характером обрабатываемой поверхности, свойствами инструмента и условиями их взаимодействия. Кроме того, «Математическая модель взаимодействия инструмента с поверхностью» передает информацию в подсистему того же уровня – «Математическую модель силы».

Информация из подсистемы третьего уровня «Математическая модель силы» и «Математическая модель взаимодействия инструмента с поверхностью» поступает в *подсистемы четвертого уровня*: «Математическая модель съема», «Математическая модель шероховатости», «Математическая модель температуры», «Математическая модель износа» и «Математическая модель расхода электроэнергии».

У подсистемы четвертого уровня «Математическая модель съема» есть подсистема «Оплата труда».

Идентификация моделей третьего и четвертого уровней связана с аппаратом формализации, используемом для описания систем. Выбор математического аппарата описания, в свою очередь, зависит от результатов идентификации, т.е. от того, насколько адекватна реальному объекту построенная по ее результатам модель.

Информация из всех подсистем четвертого уровня поступает в *управляющую подсистему* «Оптимизация параметров операции финишной обработки», относящуюся к *подсистеме пятого уровня*. Для выбора оптимального инструмента информация передается в подсистему второго уровня и процесс повторяется столько раз, сколько конкурирующих инструментов есть в наличии.

Полученная система, в результате выполнения своих функций, выдает оптимальные инструмент и режимы обработки. При реализации этой информации в технологическом процессе изготовления детали обеспечиваются требуемые показатели качества и оптимальная производительность.

Функциональные процессы в системе тесно связаны с информационными.

### ***Морфологическое описание системы***

Морфологическое описание системы производится для создания представления об *основных свойствах системы*.

Морфологическое описание можно представить выражением:

$$\Sigma = \{S_M, V_M, J_M, K_M\},$$

где  $\Sigma = \{\Sigma_i\}_i$  – множество элементов и их свойств (под элементом в данном случае понимается подсистема, вглубь которой морфологическое описание не проникает);

$V_M = \{V_{ij}\}_j$  – множество связей;  $J_M$  – структура;  $K_M$  – композиция.

### ***Элементный состав – $\Sigma$***

Под элементом в данном случае понимается подсистема, внутрь которой описание не проникает. Элементный состав (по данным [90]) в системе оптимального управления финишной операцией (см. рисунок 2.2) является *гетерогенным*, содержащим разнотипные подсистемы. По свойствам элементов (подсистем) эта система является: по содержанию – *информационной*; по степени самостоятельности – *программной*; по специализации – *разнотипной*; по времени – *регулярной*.

### ***Связи в системе – $V_M$***

Морфологические свойства системы существенно зависят от характера связей. В рассматриваемой системе заложены информационные связи, предназначенные для переноса информации от одного элемента к другому в соответствии с последовательностью выполняемых функций.

Применены связи *прямые* и *обратные*. Прямые связи предназначены для передачи информации от подсистем высокого уровня к подсистемам нижестоящего уровня. При этом качество связи определяется ее пропускной способностью и надежностью.

Обратные связи, действующие в рассматриваемой системе, имеют функцию управления процессами. Обратная связь предполагает некоторое преобразование компонента, поступающего по прямой связи, и передачу результата преобразования обратно, т.е. в направлении, противоположном функциональной последовательности (прямой связи) к одному из предыдущих элементов системы. Преобразование является тождественным (информации в информацию).

В рассматриваемой системе информация об оптимальном инструменте, выявленная в управляющей подсистеме «Оптимизация параметров операции финишной обработки» передается на вход системы (подсистема первого уровня).

Информация, поступающая в подсистемы разного уровня, может быть как детерминированной, так и стохастической.

#### ***Структура системы – $J_M$***

*Структурные* свойства систем определяются характером и устойчивостью отношений между элементами.

В анализируемой системе устойчивость структуры – *детерминированная*, в которой отношения либо неизменны, либо изменяются по некоторому закону. В данном случае, структура обладает свойством *включения* и *выключения* определенных элементов (при соответствующих условиях),

По характеру отношений между элементами структуры в рассматриваемой системе отношения являются смешанными иерархических и многосвязных.

#### ***Композиция системы – $K_M$***

*Композиционные* свойства систем определяются способом объединения элементов в подсистемы. В рассматриваемой системе заложено два вида композиционных свойств подсистем – *рецепторные* (способные преобразовывать внешнее воздействие в информационные сигналы, передавать и переносить информацию) и *рефлексивные* (способные воспроизводить внутри себя процессы на информационном уровне, генерировать информацию).

#### ***Информационное описание системы***

Информационное описание должно давать представление об организации системы. Информация это количественная мера устранения энтропии (неопределенности), мера организации системы. Информация, отражающая реальную действительность, может представлять собой: сведения, данные, сообщения и сигналы, подлежащие передаче рецепторными подсистемами, приему, обработке и хранению. Физически информация определяет предсказуемость свойств и поведения объекта во времени. Система позволяет предска-



зять, что выполнение операции финишной обработки по рассчитанным режимам и предлагаемым инструментом обеспечивают требуемое качество изделия и оптимальную производительность процесса.

Рассматриваемая система обладает информационным метаболизмом, который заключается в способности потреблять информацию из среды и сообщать информацию среде. Информация из среды поступает на входе по данным об оборудовании, заготовке и инструменте. Среде информация передается в виде рекомендуемых режимов обработки и инструменте.

Качество организации системы зависит от количества и ценности информации, которые являются взаимодополняющими категориями.

Связь между функциональным и информационным описаниями отражает эффективность и энтропию. Закон изменения эффективности от времени отражает энтропийные свойства. Связь между морфологическим и информационным описаниями отражает изменение морфологических свойств во времени.

Совокупность функционального, морфологического и информационного описаний позволяет отразить главные свойства систем.

### ***Устойчивость системы***

Важной характеристикой большой системы является ее *устойчивость* при возникновении различного рода *возмущений*. Воздействие возмущений на систему может быть как в начальных состояниях и ее входах, так и в самой ее структуре. Во всех этих случаях основным объектом анализа, как отмечено в работе [145], является поиск ответа на вопрос о том, существенно ли меняется поведение системы в результате происшедших нежелательных, незапланированных изменений. Кроме того система должна обладать способностью *организованности* и *упорядоченности*, заключающихся в способности предсказуемости и функционирования на перспективу.

В качестве объекта исследования должны рассматриваться системы в пространстве состояний (подсистемы второго, третьего и четвертого уровней по рисунку 2.2), задаваемые с помощью, например, дифференциального уравнения вида

$$\frac{dq(t)}{dt} = f(q, t), \quad q(0) = q_0 = c,$$

где  $q$  – пространство состояний,  $t$  – время, или других видов уравнений.

Такие исследования указанных подсистем будут проводиться в соответствующих главах работы.

При входе, из равновесия рассматриваемую систему могут вывести следующие возмущающие факторы:

- заготовка представлена с исходными показателями по входным параметрам, существенно отличающимися от показателей, введенных в систему;

- взаимное расположение поверхностей в заготовке не позволяет полностью реализовать финишную операцию полимерно-абразивными инструментами на всей поверхности;
- оборудование, имеющееся в наличии на производстве, не обладает требуемыми степенями свободы для реализации операции инструментами, рекомендуемыми для данной операции;
- инструмент отличается по своим эксплуатационным показателям от исследованного такой же марки и введенной в систему.

Система управления позволяет минимизировать влияние приведенных возмущающих факторов путем:

- 1) проведения дополнительных экспериментальных исследований по фактическим показателям заготовки и имеющегося инструмента;
- 2) введения дополнительной операции по обработке труднодоступного участка со сменой инструмента, которым такой участок может быть обработан;
- 3) назначения оборудования с расширенными технологическими возможностями или применения специально спроектированного оборудования.

Критерием результативности функционирования системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки следует считать обеспечение стабильности выходных показателей для различных зон обрабатываемых поверхностей в пределах, установленных нормативно-техническими документами (далее – НТД).

### **2.1.2 Алгоритм проектирования технологической операции**

Алгоритм последовательности действий при проектировании технологической операции представлен на рисунке 2.3. Как уже было отмечено выше, процесс проектирования начинается с ввода в систему входных данных (на схеме блок 1).

Финишная обработка полимерно-абразивными инструментами, как и любой другой вид обработки, обладает определенными ограничениями в функциональных возможностях. Блок 2 предусмотрен для проведения такого анализа. Если функциональные возможности не препятствуют реализации данной операции (блок 3), то информация передается на блок 6 для проектирования операции. Если реализация не возможна, информация передается на блок 4, где решается вопрос о передаче информации на блок 5 для формирования управляющего воздействия или об отказе от дальнейшего проектирования операции.

На стадии формирования управляющего воздействия (блок 5) принимается решение об изменении входных параметров по оборудованию, заготовке и инструменту, которые передаются в блок 1.



Рисунок 2.3 – Алгоритм функционирования системы, процессов и подпроцессов операции

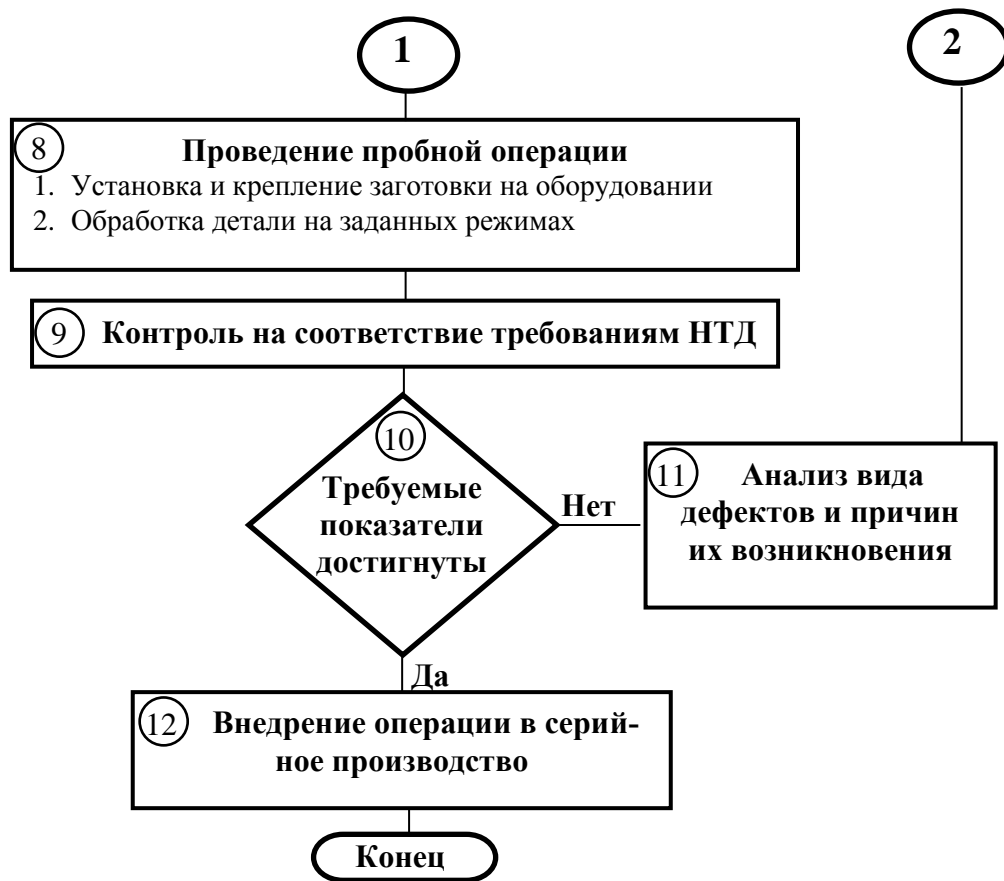


Рисунок 2.3 – Окончание

Проектирование операции (блок 6) заключается в вводе входных параметров и в выполнении всех предусмотренных функций в пространстве состояний в подсистемах второго и третьего уровней. Особая роль в системе управления отводится управляющей подсистеме «Оптимизация параметров операции финишной обработки».

Оптимизация процесса выполнения операции, предусмотренная в блоке 6, заключается в выборе экономически оптимальных инструмента и режимов обработки и разрабатывается на основе математических моделей (полученных аналитическим или эмпирическим путем):

- производительности процесса обработки,
- формирования поверхностного слоя по шероховатости,
- износа инструмента,
- температуры в зоне резания.

При этом учитываются затраты на оплату труда, расход электроэнергии и стоимость полимерно-абразивного инструмента на выполнение операции.

В результате оптимизации определяются оптимальные режимы обработки и наиболее выгодный для применения инструмент.

В связи с тем, что значения большинства входных параметров являются стохастическими, результаты выполнения операции на рассчитанных оптимальных

режимах и инструменте могут оказаться не соответствующими требованиям НТД. Поэтому в системе предусмотрено проведение пробной обработки (блоки 7 и 8). В случае отклонений от требований НТД, по блокам 9 и 10 проводится анализ видов дефектов и причин их возникновения (блок 11) с последующим управляющим воздействием на параметры обработки.

Внедрение спроектированной операции финишной обработки в серийное производстве (блок 12) должно происходить только при полной уверенности в обеспечении выпуска качественной продукции.

### **2.1.3 Оценка качества выходных параметров обработки**

Поскольку любой из показателей качества после обработки полимерно-абразивными инструментами является случайной величиной, распределенной в соответствии с вероятностным законом, оценку правильности выполнения операции необходимо производить по доверительным границам рассматриваемого параметра. При этом входные параметры элементов системы имеют как стохастический, так и детерминированный характер.

К вектору входных параметров со стохастическими показателями относятся: по заготовке – исходная шероховатость поверхности, размер и форма заусенца на кромке; по инструменту – параметры режущего микрорельефа, свойства связки; по режимам обработки – неточность введения рассчитанных по системе управления режимных параметров.

К параметрам с детерминированными характеристиками следует отнести данные по оборудованию (частота вращения шпинделя, подача, средства базирования и крепления заготовки).

Оценка соответствия выходных параметров обработки требованиям НТД может осуществляться двумя методами:

- первый метод заключается в *прогнозировании* доверительных границ каждого выходного параметра на основе анализа влияния входных параметров и установлении доверительных границ погрешности оценки,
- второй метод основан на использовании результатов контроля *фактических значений* выходных параметров по блоку «Контроль на соответствие требованиям НТД» (см. рисунок 2.3)

#### ***Прогнозирование доверительных границ***

Распределение внутри границ этих составляющих рассматриваются как распределение случайных величин. При отсутствии данных о виде распределения, по [43] рекомендуется принимать как равномерное распределение.

Доверительные границы показателей качества в результате выполнения операции  $\Theta_{\Sigma}$  вычисляются путем построения композиции для каждого показателя качества. При равномерном распределении доверительные границы вычисляются по формуле:

$$\Theta_{\Sigma} = \pm k_1 \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^m X_j^2},$$

где  $X_j$  – граница  $j$ -ой составляющей входного параметра (исходная шероховатость, микро-рельеф режущей поверхности инструмента, вид абразивного зерна, связка абразивного инструмента, положение инструмента относительно обрабатываемой поверхности);

$k_1$  – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью  $P$  и числом  $m$  составляющих входных показателей и их соотношением между собой.

Для доверительной вероятности  $P = 0,95$  коэффициент  $k_1$  пренебрежимо мало зависит от числа составляющих входных показателей  $X_j$  и их соотношения, поэтому при указанной доверительной вероятности коэффициент  $k_1$  принимается равным 1,1.

Доверительные границы погрешности оценки выходного параметра находятся путем построения композиции распределений случайных погрешностей и оцениваемого показателя качества, рассматриваемых как случайные величины. Границы погрешности оцениваемой величины  $\Delta$  (без учета знака) вычисляются по формуле:

$$\Delta = \pm K_1 \cdot S_{\Sigma},$$

где  $K_1$  – коэффициент, зависящий от закона распределения стохастических входящих величин и принятой доверительной вероятности, При числе наблюдений  $n < 30$  в [33] рекомендуется использовать коэффициент Стьюдента.

$S_{\Sigma}$  – суммарное среднее квадратичное отклонение стохастических входных величин для каждого выходного показателя операции:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( S_i \cdot \frac{\partial X_j}{\partial x_i} \right)^2},$$

где  $S_i$  – среднее квадратичное отклонение  $i$ -го стохастического входного параметра, влияющего на рассматриваемый показатель качества;

$\frac{\partial X_j}{\partial x_i}$  передаточное отношение (коэффициент влияния) на функцию  $X_j$  параметра  $x_i$ , влияющего на показатель качества.

### ***Оценка по фактическим значениям выходных параметров***

По блоку «Контроль на соответствие требованиям НТД» проводится следующими способами:

1. При однократном измерении:

- запланированными средствами измерений и сопоставлением с допустимыми значениями измеряемого параметра.

2. При многократном измерении:

- согласно [43] предусматривается исключение грубых промахов с использованием критерия Граббса и определение доверительных границ случайной погрешности.

Статистический критерий Граббса исключения грубых погрешностей основан на предположении о том, что группа результатов измерений принадлежит нормальному распределению. Для этого вычисляют критерии Граббса  $G_I$  и  $G_{II}$ , предполагая, что наибольший  $x_{max}$  и наименьший  $x_{min}$  результат измерений вызван грубыми погрешностями:

$$G_I = \frac{|x_{max} - \bar{x}|}{S}; G_{II} = \frac{|\bar{x} - x_{min}|}{S};$$

Сравнивают  $G_I$  и  $G_{II}$  с теоретическим значением  $G_T$  критерия Граббса при выбранном уровне значимости  $P$ . Таблица критических значений критерия Граббса приведена в приложении А к ГОСТ Р 8.736-2011 [43]. Если  $G_I > G_T$ , то  $x_{max}$  исключают как маловероятное значение. Если  $G_{II} > G_T$ , то  $x_{min}$  исключают как маловероятное значение.

Возможно использование и других методов определения грубых промахов результатов измерений, например, предусмотренных по ГОСТ 11.002-73 «Прикладная статистика. Правила оценки аномальности результатов наблюдений».

Среднее квадратичное отклонение  $S$  группы, содержащей  $n$  результатов измерений, вычисляют по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}.$$

#### ***Определение доверительных границ случайной погрешности***

Доверительные границы  $\varepsilon$  (без учета знака) случайной погрешности оценки измеряемой величины вычисляют по формуле:

$$\varepsilon = t \cdot s_{\bar{x}},$$

где  $t$  – коэффициент Стьюдента;

$s_{\bar{x}}$  – среднее квадратичное отклонение среднего арифметического:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}.$$

Выходной параметр обработки является годным, если его доверительные границы не выходят за пределы допустимых значений, регламентированных НТД.

### **2.1.4 Причинно-следственные взаимосвязи в системе управления финишной обработкой**

Для стабильного обеспечения качества финишной обработки необходимо выявить все протекающие процессы и влияющие факторы.

Система управления качеством выходных параметров представлена на рисунке 2.4 причинно-следственной диаграммой процесса финишной обработки (схема Исикавы), в

которой приведены процессы и факторы, влияющие на качественное выполнение системы управления финишной обработкой.

Причинно-следственная диаграмма (схема Исикавы) предназначена для структурирования отношений между некоторым заранее определенным показателем качества и множеством факторов, которые могут влиять на этот показатель.

В диаграмме выделены главные причины, влияющие на данный показатель качества: оборудование, заготовка, инструмент, режимы обработки, а также главные факторы, обеспечивающие выпуск качественной и экономически оптимальной продукции: контроль качества и экономические факторы.

Затем выделены вторичные причины (факторы), влияющие на главные, (факторы 2-го уровня), и факторы 3-го уровня, влияющие на факторы 2-го уровня.

Подробное рассмотрение влияния причин и факторов всех уровней будет проведено в соответствующих главах работы.

Таким образом, на основе анализа системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки полимерно-абразивными инструментами, можно констатировать о необходимости создания научных подходов к решению задач в пространстве состояний и разработке соответствующих математических моделей:

- взаимодействия инструмента с поверхностью;
- сил взаимодействия инструмента с деталью;
- съема материала (производительности процесса обработки);
- формирования шероховатости обработанной поверхности;
- температуры в зоне резания;
- износа инструмента.

Также необходима разработка управляющей подсистемы по оптимизации параметров операции финишной обработки, а также решение вопросов применимости для выполнения рассматриваемых финишных операций в условиях авиационного производства различных видов оборудования (промышленных роботов, станков с ЧПУ, возможна необходимость разработки нового оборудования и т.д).





Рисунок 2.4 – Причинно-следственная диаграмма процесса финишной обработки (схема Исикавы)

## **2.2 Инструментальное обеспечение процесса финишной обработки, выбранное для проведения комплекса экспериментальных исследований**

Как было отмечено в главе 1, полимерно-абразивные инструменты используются при отделочно-зачистных и финишных операциях с целью уменьшения шероховатости до требуемых значений, удаления заусенцев, скругления острых кромок и других операций.

Обработка полимерно-абразивными инструментами имеет ряд существенных особенностей, отличающих ее от обработки шлифовальными кругами. При обработке полимерно-абразивными инструментами отсутствует такой режимный параметр обработки, как глубина резания. При этом работа абразивных зерен обеспечивается за счет их предварительного нагружения, то есть деформируется основание инструмента, которое прижимается к поверхности обрабатываемой детали. Таким образом, вводится такой режимный параметр обработки, как «деформация инструмента».

Закрепление абразива в гибкой (полимерной) связке полностью изменяет характер его взаимодействия с поверхностью обрабатываемой детали. Это заключается в следующем:

- амортизируется удар зерна об обрабатываемую поверхность, в результате чего повышается его износостойкость;
- уменьшается температура в зоне обработки, вплоть до полного исключения прижогов;
- отсутствует микрорастрескивание поверхностного слоя, что позволяет успешно обрабатывать в том числе и хрупкие материалы;
- увеличивается количество одновременно работающих абразивных зерен;
- увеличивается время взаимодействия абразивного зерна с поверхностью обрабатываемой детали.

В результате всего вышеперечисленного, улучшается качество обработанной поверхности.

Особенностью работы зерна в эластичной связке является его возможность «отжиматься» во время работы. Каждое абразивное зерно, закрепленное в упругом основании, имеет возможность перемещения как при деформации всей массы связки, так и при деформации малых ее объемов, непосредственно прилегающих к зерну. При жестком закреплении траектория движения абразивного зерна определяется только кинематикой процесса.

### **2.2.1 Эластичные полимерно-абразивные круги компании 3М**

Для проведения комплекса экспериментальных исследований в области финишной обработки деталей машин решено использовать эластичные полимерно-абразивные круги компании 3М (Minnesota Mining and Manufacturing Company) [270], изготовленные из абразивного материала Scotch-Brite™ (рисунки 2.5 – 2.9 [270]). Этот материал состоит из синтетических волокон, образующих трехмерное гибкое нетканое полотно, по всему объему которого равномерно распределены абразивные зерна. Выбор данных инструментов обусловлен их высокой эластично-

стью, а, соответственно, возможностью эффективно решать поставленные в настоящей работе задачи, а также отсутствием выпускаемых отечественными предприятиями аналогов.



**Рисунок 2.5 – Прессованные круги марки FS-WL**



**Рисунок 2.6 - Прессованный круг марки DB-WL**



**Рисунок 2.7 - Лепестковый круг марки CF-FB**



**Рисунок 2.8 – Лепестковые круги марки CB-ZS**



**Рисунок 2.9 – Лепестковые круги марки FF-ZS**

В таблице 2.1 приведены обозначения зернистостей абразивных материалов Scotch-Brite™ [270].

**Таблица 2.1 – Обозначения и соответствие зернистостей абразивных материалов Scotch-Brite™ [270]**

Международное название	Русское описание	Обозначение зернистости Scotch-Brite™	Обозначение зернистости FEPA	Обозначение зернистости ГОСТ 3647-80	Размер зерна, мкм
EXTRA COARSE	очень грубое зерно	XCS	P40 P50 P60	40 32 25	>250
COARSE	грубое зерно	CRS	P120 P150	12 10	105-125 74-105
MEDIUM	среднее зерно	MED	P220 P240	6 M63	53-74 55-60
FINE	тонкое зерно	FIN	P280 P320	M50 –	50-53,5 45-50
VERY FINE	очень тонкое зерно	VFN	P320 P360	– –	45-50 40,5-44

SUPER FINE	супертонкое зерно	SFN	P400	M40	32,5-36
ULTRA FINE	ультратонкое зерно	UFN	P500	–	28,7-31,7
EXTRA FINE	экстратонкое зерно	XFN	P800	–	20,6-23,6
TYPE T	безабразивный материал	T	–	–	–

Согласно информации производителя [270], данные эластичные полимерно-абразивные круги обеспечивают стабильное качество обработки поверхности без излишнего съема материала и без изменения формы и размера детали.

Характеристики данных инструментов приведены в соответствующих разделах диссертационной работы.

### 2.2.2 Полимерно-абразивные щетки компании 3М

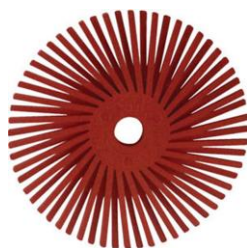
Согласно [57], щетки могут быть: абразивосодержащие, неабразивные, проволочные.

К основным характеристикам щеток следует отнести: тип, материал, размер и геометрические параметры ворсин, свободная длина ворсин, плотность материала рабочей части, диаметр, ширина щетки, форма и размеры посадочного отверстия [57].

Комплекс исследований в рамках настоящей работы решено проводить при помощи цельнолитых радиальных щеток компании 3М марок С ВВ-ZB с изогнутыми ворсинами (рисунок 2.10) и А ВВ-ZB – с прямыми ворсинами (рисунок 2.11) [270]. Щетки Scotch-Brite™ Bristle [270] выпускаются в виде тонких дисков с гибкими ворсинами по окружности, изготовленных из полимерного синтетического материала. По всему объему инструмента равномерно распределены зерна абразивного материала 3М Cubitron™ [270]. Из нескольких дисков, показанных на рисунке 2.10 и рисунке 2.11, на оправке возможно собрать щетку практически любой ширины.



**Рисунок 2.10 – Радиальные щетки марки ВВ-ZB Type С**



**Рисунок 2.11 – Радиальные щетки марки ВВ-ZB Type А**



**Рисунок 2.12 – Торцевые щетки марки ВD-ZB**

Компанией 3М (Minnesota Mining and Manufacturing Company) [270] также выпускаются цельнолитые торцевые щетки Scotch-Brite™ ВD-ZB и Scotch-Brite™ Bristle RD-ZB, изготовленные из аналогичного полимерного материала, по всему объему которого распределены зерна

минерала 3M™ Cubitron™. Информация производителя об абразивном материале Cubitron™ приведена в п. Д.1 приложения Д.

На рисунке 2.12 приведены щетки Scotch-Brite™ BD-ZB, на которых будут проведены экспериментальные исследования. Следует отметить, что торцевые полимерно-абразивные щетки могут эффективно применяться в труднодоступных для радиальных щеток местах.

Характеристики использованных при экспериментальных исследованиях радиальных и торцевых щеток приведены в соответствующих разделах работы.

## 2.3 Обрабатываемые материалы, образцы и металлорежущее оборудование, использованное для проведения исследований в области финишной обработки

### 2.3.1 Обрабатываемые материалы

Исследование процесса финишной обработки полимерно-абразивными инструментами решено проводить на высокопрочных алюминиевых и титановых сплавах, как наиболее широко применяемых в авиационной промышленности. В таблице 2.2 приведен химический состав алюминиевых сплавов (В95пчТ2, В95очТ2, В95очАТ2В, 1973Т2, 1161Т и 1163Т, 1163РДТВ) согласно справочным данным.

В таблице 2.3 приведен химический состав титановых сплавов (ВТ1, ВТ 3-1, ВТ5, ВТ6, ВТ9, ВТ14, ВТ20), согласно справочным данным.

Анализ физико-механических свойств данных материалов показал, что их различие по пределу текучести, как одному из наиболее существенных характеристик обрабатываемости металлов, несущественно. Поэтому для проведения всех экспериментальных исследований были приняты широко используемые в авиационной промышленности материалы: высокопрочный алюминиевый сплав В95пчТ2 и титановый сплав ВТ20, которые являются типовыми представителями высокопрочных алюминиевых и титановых сплавов соответственно.

**Таблица 2.2 – Химический состав и механические свойства высокопрочных алюминиевых сплавов**

Материал	Вид заготовки	Примеси к Al, %									Механические свойства	
		Fe, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Ti, %	Cu, %	Mg, %	Zn, %	Прочие	$\sigma_s$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
В95пчТ2 В95очТ2 В95очАТ2В	Плита	0,05-0,25	до 0,1	0,2-0,6	0,1-0,25	до 0,05	1,4-2,0	1,8-2,8	5-6,5	до 0,2	460-580	365-500
1973Т2	Плита	до 0,15	до 0,1	до 0,1	до 0,05	0,02-0,07	1,4-2,2	2,0-2,6	5,5-6,7	до 0,2	470-570	410-520
1161Т	Плита	до 0,15	до 0,1	0,5-0,8	до 0,05	0,01-0,07	4,1-4,5	1,3-1,6	до 0,1	до 0,1	440-445	310-320
1163Т 1163РДТВ	Плита	до 0,15	до 0,1	0,5-0,8	до 0,05	0,01-0,07	4,1-4,5	1,3-1,6	до 0,1	до 0,1	430-450	372-392

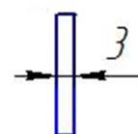
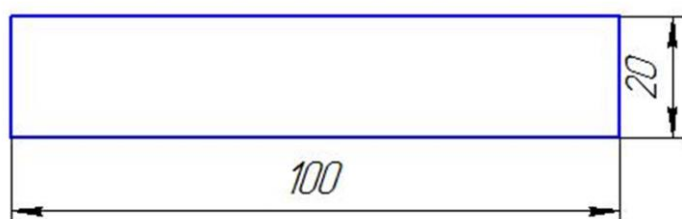
**Таблица 2.3 – Химический состав и механические свойства титановых сплавов**

Материал	Вид заготовки	Основные компоненты, % (остальное Ti)							Примеси, %	Механические свойства	
		Al, %	V, %	Mo, %	Si, %	Zr, %	Cr, %	Fe, %		$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BT3-1	Плита	5,3-7,0	-	2,0-3,0	0,15-0,4	-	0,8-2,3	0,2-0,7	<0,85	931	815
BT5	Плита	4,1-6,2	<0,5	<0,5	-	-	-	-	<1,85	687	618
BT6	Плита	5,0-6,5	3,5-4,5	-	-	-	-	-	<1,25	834	736
BT9	Плита	5,6-7,0	-	2,8-3,8	0,2-0,35	0,8-2,0	-	-	<0,7	931	815
BT14	Плита	4,3-6,3	0,9-1,9	2,5-3,8	-	-	-	-	<1,35	883	785
BT20	Плита	5,5-7,5	0,8-1,8	0,5-2,0	-	1,5-2,5	-	-	<0,85	883	785

Для особо тонких процессов взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемым материалом, к которым относятся способы обработки полимерно-абразивными инструментами, механические свойства материалов, приведенные в таблицах 2.2 и 2.3, не всегда соответствуют свойствам в тонких поверхностных слоях. По работам А.С. Ахматова [14], И.В. Крагельского [113, 114], Г.И. Грановского [51], Е.А. Марченко [134] и ряда других исследователей известно, что существуют различия в физических свойствах металла между его поверхностными слоями и объемом. Поэтому при аналитических исследованиях параметров взаимодействия абразивного инструмента на гибкой (полимерной) связке с обрабатываемой поверхностью, эта особенность тонкого поверхностного слоя учтена и приведена в соответствующих разделах настоящей работы.

### 2.3.2 Образцы, изготовленные для проведения исследований

Для исследования производительности процесса финишной обработки (по съему материала и скруглению кромок) и качества обработанной поверхности (по шероховатости и остаточным напряжениям) разработаны образцы, представляющие собой пластины размерами 3×20×100мм (рисунок 2.13), изготовленные из высокопрочного алюминиевого сплава В95ПчТ2 и титанового сплава BT20.



**Рисунок 2.13 – Образец для исследования производительности процесса и качества обработанной поверхности**

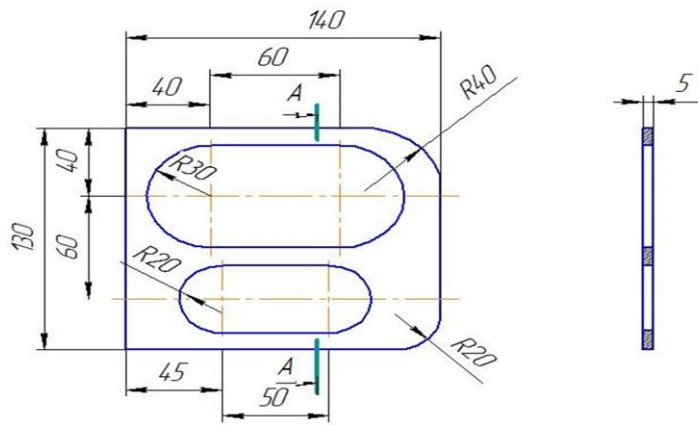


Рисунок 2.14– Эскиз 1 образца с различным сочетанием поверхностей

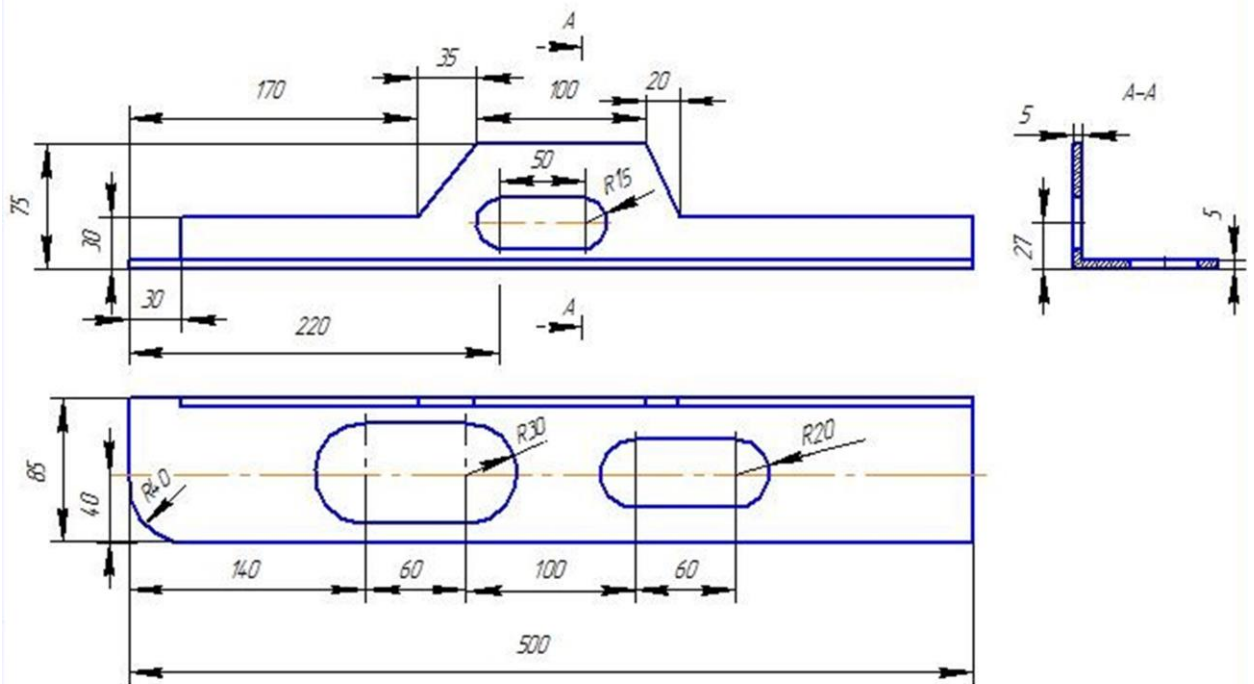


Рисунок 2.15 – Эскиз 2 образца с различным сочетанием поверхностей

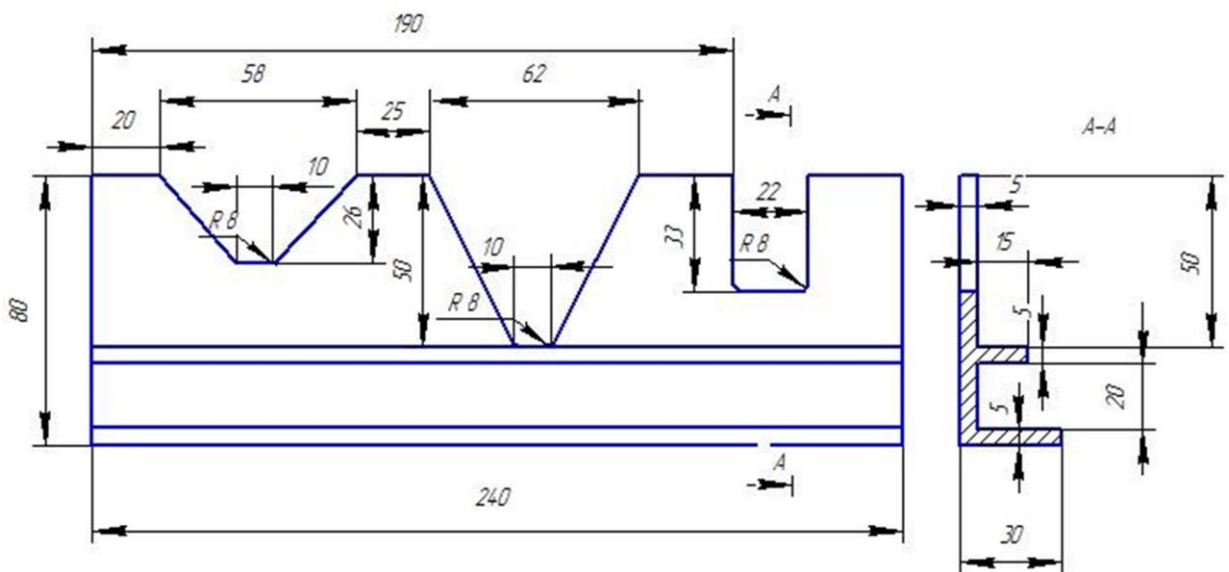


Рисунок 2.16 – Эскиз 3 образца с различным сочетанием поверхностей



Финишная обработка в авиастроении не ограничивается только обработкой простых и легкодоступных участков деталей. Учитывая это, был проведен анализ конструктивных особенностей номенклатуры деталей самолета МС-21, на которой предусмотрены отделочно-зачистные операции (более 500 наименований) и были спроектированы и изготовлены опытные образцы, в которых представлены возможные сочетания поверхностей, встречающихся на данных деталях (в том числе на длинномерных типа профилей).

На рисунках 2.14, 2.15 и 2.16 приведены эскизы данных опытных образцов, которые были изготовлены из высокопрочного алюминиевого сплава В95ПчТ2 и титанового сплава ВТ20.

Технология обработки кромок при сочетании различных поверхностей на этих образцах будет зависеть от выбора инструмента и режимов обработки.

### 2.3.3 Металлорежущее оборудование для проведения исследований

Скорость резания эластичными абразивными инструментами, связкой которых является полимер, ограничена температурой плавления связки и существенно ниже скорости резания при шлифовании. Поэтому для проведения экспериментальных исследований выбран современный вертикальный универсально-фрезерный станок Deckel Maho DMC 635V (Германия) [246] (рисунок 2.17), способный обеспечить невысокую скорость резания. Опытные образцы необходимо закреплять на столе станка. Поэтому в процессе подготовки к исследованиям было сконструировано и изготовлено специальное приспособление.



**Рисунок 2.17 – Вертикальный обрабатывающий центр Deckel Maho DMC 635V**

Исследования производительности и качества обработанных поверхностей при их сложных сочетаниях, представленных на рисунках 2.14, 2.15 и 2.16, решено проводить на работе KUKA KR 210 R2700 EXTRA (Германия) [246], который показан на рисунке 2.18. На работе установлен электрошпиндель (рисунок 2.19) производства Elettromeccanica Giordano Colombo (Италия) модели RC90 и используется стол производства Forster (Германия) размерами 4000x1500 мм, который также можно наблюдать на рисунке 2.18. Более подробная информация о данном оборудовании, а также его технические характеристики приведены в п. Д.2 приложения Д.





**Рисунок 2.18 – Промышленный робот  
KUKA KR 210 R2700 EXTRA**



**Рисунок 2.19 – Электрошпиндель  
Elettromeccanica Giordano Colombo**



*Балансировку инструмента* целесообразно производить на модульной балансировочной системе Haimer TD2009 Comfort Plus (Германия), которая имеется в лаборатории [246], и показана на рисунке 2.20. Технические характеристики данного оборудования, согласно [144], приведены в п. Д.3 приложения Д.

Балансировка проводилась по ГОСТ ИСО 1940-1-2007 «Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. Часть 1. Определение допустимого дисбаланса» по классу точности балансировки G6,3.

**Рисунок 2.20 – Балансировочная машина  
Haimer TD2009 Comfort Plus**

## **2.4 Измерительные средства, использованные в процессе проведения экспериментальных исследований**

### **2.4.1 Исследования производительности процесса обработки**

*Съем материала* при обработке плоскостей, как основную характеристику производительности процесса, необходимо оценивать путем взвешивания опытных образцов до и после обработки.

Для взвешивания целесообразно воспользоваться электронными аналитическими весами OHAUS DV214C (Швейцария) (рисунок 2.21). Основные характеристики весов приведены в таблице Д.4 приложения Д.



**Рисунок 2.21 – Аналитические весы Ohaus серии Discovery (DV) модель DV214C**



*Оценку производительности процесса при скруглении кромок* возможно провести путем измерения размеров скругленных кромок на большом инструментальном микроскопе с цифровым отсчетным устройством БМИ 1Ц (Россия) (рисунок 2.22). Технические характеристики данного микроскопа приведены в таблице Д.5 приложения Д.

**Рисунок 2.22 - Большой инструментальный микроскоп с цифровым отсчетным устройством БМИ 1Ц**

#### **2.4.2 Исследования микрогеометрии поверхностей**

Исследование микрогеометрии необходимо при изучении режущего микрорельефа полимерно-абразивного инструмента, шероховатости на обработанных поверхностях и в том числе на скругленных кромках.

Для исследования шероховатости обработанных поверхностей деталей, а также для изучения микрорельефа режущей поверхности эластичных полимерно-абразивных кругов в настоящей работе был использован профилограф-профилометр Taylor Hobson Form Talysurf i200 (Великобритания) [339] (рисунок 2.23), имеющийся в лаборатории [246].

Основные технические характеристики профилометра приведены в таблице Д.6 приложения Д.



**Рисунок 2.23 – Прибор Taylor Hobson Form Talysurf i200**

*Измерение шероховатости на скругленных кромках* целесообразно проводить на оптическом профилометре *Bruker Contour GT-KI*.



**Рисунок 2.24 - Оптический профилометр Bruker Contour GT-KI**

Bruker Contour GT-KI (Германия) (рисунок 2.24), имеющийся в лаборатории [246].

Технические характеристики прибора, приведенные в его паспорте и на официальном сайте производителя [273], представлены в таблице Д.7 приложения Д.

Согласно ОСТ 1.000.22-80 в самолетостроении предусмотрено скругление кромок на деталях 0,5 мм с допустимыми отклонениями  $\pm 0,2$  мм.

Вышеописанный прибор (профигограф-профилометр Taylor Hobson Form Talysurf i200) не позволяет осуществить измерение микронеровностей на малых радиусах закругления.

Поэтому для изучения микронеровностей на скругленных кромках образцов решено использовать оптический профилометр

### **2.4.3 Исследование сил резания**

Экспериментальные исследования сил резания при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами и полимерно-абразивными щетками (радиальными и торцевыми) в настоя-

шей работе выполнялись в лаборатории [246] на универсально-фрезерном станке марки Deckel Maho DMC 635V (см. рисунок 2.17) с использованием трехкомпонентного динамометра фирмы Kistler (Швейцария) модели 9253B23.

Для изучения нормальной и тангенциальной составляющих силы резания, опытные образцы необходимо крепить в специальном приспособлении и обрабатывать при различных режимных параметрах обработки.

Сила, как основной фактор, влияющий на процесс резания и интенсивность износа инструмента при обработке полимерно-абразивными инструментами, включает следующие составляющие: силы упругой деформации зоны круга, которая находится в упруго-деформированном состоянии; центробежной силы и ударного импульса, который возникает при вступлении в контакт полимерно-абразивного инструмента с обрабатываемой деталью.

Основным элементом измерительной системы является трехкомпонентный динамометр фирмы Kistler (Швейцария), модель 9253B23, внешний вид которого представлен на рисунке 2.25 [244].

Для усиления и преобразования сигнала используется 8-канальный усилитель-преобразователь типа 5070A01110 фирмы Kistler (Швейцария).

Для сбора и анализа данных используется программное обеспечение DynoWare 2.4.1.6 Kistler (Швейцария), установленное на ноутбуке (см. рисунок 2.25) и совместимое с динамометрами или одно- и многокомпонентными датчиками силы.



*а)*



*б)*

**Рисунок 2.25 – Трехкомпонентный динамометрический комплекс:**

*а)* – динамометр Kistler 9253B23; *б)* – 8-канальный усилитель-преобразователь Kistler 5070A01110 и ноутбук с программным обеспечением DynoWare 2.4.1.6

Схема подключения динамометрического комплекса, краткое описание принципов его работы, а также технические характеристики приведены в п. Д.8 приложения Д.



#### **2.4.4 Исследование температуры в зоне контакта полимерно-абразивного инструмента с обрабатываемой деталью**

Для исследования температуры в зоне обработки в настоящей работе использована высокоскоростная тепловизионная камера FLIR Orion SC7000M (Швеция) (рисунок 2.26), поскольку исследование температуры в зоне обработки при помощи тепловизора имеет ряд преимуществ по сравнению с другими известными методами [226], например: простота и наглядность, достоверность, быстрота проведения экспериментов.



**Рисунок 2.26 - Тепловизор FLIR Orion SC7000M**

Физической основой для создания тепловизора послужил эффект, связанный со способностью некоторых веществ (материалов) изменять свои электрические свойства (в частности, проводимость) под воздействием электромагнитного излучения в инфракрасном диапазоне [226, 227].

Технические характеристики камеры FLIR Orion SC7000M приведены в п. Д.9 приложения Д.

### **2.5 Статистическая обработка полученных данных**

На производительность процесса обработки и качество обработанной поверхности при финишной обработке полимерно-абразивными инструментами влияют основные технологические параметры процесса обработки, а именно: скорость резания (для торцевых щеток – частота вращения), натяг (деформация инструмента) и продольная подача (при скруглении кромок – подача вдоль кромки). Эти параметры являются наиболее важными с точки зрения оптимизации процессов финишной обработки деталей. Одним из наиболее эффективных методов для поиска зависимостей между входными параметрами и получаемыми результатами является регрессионный анализ [138]. Эмпирические регрессионные модели широко применяются в машиностроении и успешно могут быть использованы в том числе и для прогнозирования результатов финишной обработки полимерно-абразивными инструментами.

#### **2.5.1 Рациональное планирование экспериментов**

Методы рационального планирования экспериментов играют большую роль в изучении подобных процессов. Эти методы являются технологической основой робастного проектирования [85]. Планирование эксперимента осуществляется с целью достижения наибольшей точности полученных результатов исследования при наименьшем количестве проведенных опытов и сохранении статистической достоверности результатов [49, 54, 269, 330].

Диапазон варьирования факторов зависит от поставленных задач, технологических возможностей оборудования, а также характеристик инструмента. Варьирование факторов должно

обеспечивать наиболее полное описание исследуемой проблемы без ее значительного усложнения.

План эксперимента, в котором каждый вариант испытаний появляется один и только один раз в строке (положение) и столбце называется латинским квадратом [251]. В настоящей работе было использовано планирование эксперимента с помощью латинского квадрата. Согласно [197], данная методика объединяет метод рационального планирования экспериментов и метод случайного баланса, который позволяет построить аппроксимирующую функцию с высокой степенью точности и минимальными трудовыми и временными затратами.

Использование такого плана с последующим регрессионным анализом позволит выявить частные (линейные, квадратичные и т.д.) зависимости от каждого из влияющих факторов. Пример полученного плана экспериментов представлен в таблице 2.4.

**Таблица 2.4 – Пример плана экспериментов для исследования зачистки поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами на универсально-фрезерном станке**

Скорость, м/мин	Деформация круга, мм	Подача, мм/мин			
		42	130	255	395
237,98	0,5		+		
	1			+	
	1,5	+			
	2				+
477,52	0,5	+			
	1				+
	1,5		+		
	2			+	
598,87	0,5				+
	1			+	
	1,5		+		
	2	+			
766,55	0,5			+	
	1				+
	1,5	+			
	2		+		

### 2.5.2 Оценка значимости (незначимости) влияния рассматриваемого фактора на исследуемый выходной параметр (дисперсионный анализ)

Заключение о значимости или незначимости влияния рассматриваемого фактора на исследуемый выходной параметр получено с использованием критерия Фишера. Если  $F = (S_A^2/S_0^2) > F_{0,95}$ , то фактор значимо влияет на исследуемую величину.

Здесь  $S_A^2$  – дисперсия фактора  $S_A^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2 - \frac{S_0^2}{n}$ ;  $S_0^2$  – дисперсия по всем уровням фактора  $S_0^2 = \frac{1}{k(n-1)} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$ ;  $F_{0,95}$  – критерий Фишера при доверительной вероятности 0,95. Например, при степенях свободы  $f_1 = k - 1 = 3$  и  $f_2 = k(n - 1) = 20$  этот критерий по справочным данным [199] равен  $F_{0,95} = 3,1$ .

### 2.5.3 Регрессионный анализ

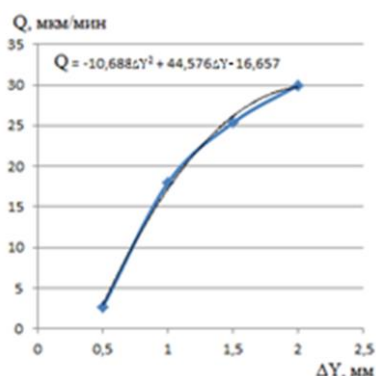
Для получения частных формул (поиска коэффициентов регрессии), возможно применение пакета Microsoft Excel, в котором существует возможность поиска уравнений регрессии при помощи метода наименьших квадратов (НК-метод).

Метод наименьших квадратов — это математическая процедура составления линейного уравнения, максимально соответствующего набору упорядоченных пар, путем нахождения значений для  $a$  и  $b$ , коэффициентов в уравнении прямой [292]. Цель метода наименьших квадратов состоит в минимизации общей квадратичной ошибки между значениями  $y$  и  $\hat{y}$ . Если для каждой точки определяется ошибка  $\hat{y}$ , то метод наименьших квадратов минимизирует:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min$$

где  $n$  = число упорядоченных пар вокруг линии, максимально соответствующей данным [292].

Пример получения подобного уравнения регрессии приведен на рисунке 2.27.



**Рисунок 2.27 – Пример получения частного уравнения регрессии (зависимость производительности процесса обработки от деформации инструмента) при помощи метода наименьших квадратов в среде Microsoft Excel**

Для получения многофакторной регрессионной модели, которую будет удобно использовать в практических целях, проводится аппроксимация полученных данных в виде уравнений, как правило, представляющих собой полином второй степени:

$$F = a_1 \cdot X^2 + a_2 \cdot Y^2 + a_3 \cdot Z^2 + a_4 \cdot X + a_5 \cdot Y + a_6 \cdot Z + a_7 \cdot X \cdot Y + a_8 \cdot X \cdot Z + a_9 \cdot Y \cdot Z + a_{10} \cdot X \cdot Y \cdot Z + a_{11},$$

где  $X, Y, Z$  – влияющие факторы.

Получение коэффициентов и свободных членов данных регрессионных моделей возможно путем решения систем уравнений в программной среде Mathcad 15 на основании данных, полученных по частным уравнениям. После этого необходимо провести проверку полученной математической модели на адекватность. Проверка должна проводиться по всему диапазону проведения экспериментальных исследований. При отклонениях данных более 5%, полученных по частному уравнению регрессии и многофакторной регрессионной модели, необходимо провести анализ и корректировку коэффициентов, а в случае невозможности решения проблемы таким способом – необходим перевод полинома на более высокую степень или выбор иного вида регрессионного уравнения.

Проверку адекватности теоретических математических моделей необходимо осуществлять путем проведения экспериментальных исследований. Доверительные границы отклонений экспериментальных от теоретически полученных данных определяются по выражению:

$$\varepsilon = t \cdot S,$$

где  $t$  – коэффициент Стьюдента при заданной доверительной вероятности,  $S$  – среднеквадратичное отклонение, которое находится по формуле:

$$S = \sqrt{\sum_1^n (X_i - X_t)^2 \cdot \frac{1}{n \cdot (n - 1)}},$$

где  $n$  – количество экспериментальных значений,  $X_i$  – значения, полученные экспериментально,  $X_t$  – значения, полученные теоретически.

## Результаты и выводы по главе 2

1. На основе проведенного системного анализа разработана общая структура системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки (зачистка поверхностей и скругление кромок) в авиастроении, которая позволяет определять оптимальный инструмент (из имеющихся в наличии), оптимальные режимные параметры обработки, корректировать параметры при появлении возмущающих факторов с последующим определением оптимальных параметров обработки и обеспечивать оптимальную производительность процесса с учетом ограничительных функций.
2. Обоснована необходимость создания научных подходов к решению задач в пространстве состояний в рамках рассматриваемой системы управления и разработке ряда теоретических и эмпирических математических моделей, а также разработке управляющей подсистемы по оптимизации выбора полимерно-абразивного инструмента и параметров операции финишной обработки.
3. Проанализированы процессы и выявлены факторы, влияющие на качественное выполнение системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки и, как следствие, на стабильность обеспечения качественной и экономически эффективной финишной обработки полимерно-абразивными инструментами.
4. Выбрано инструментальное обеспечение, техническое и программное оснащение экспериментальной части работы, в том числе марки высокопрочных алюминиевых и титановых сплавов, обоснован выбор эластичных полимерно-абразивных кругов и щеток компании 3M, как типовых представителей полимерно-абразивных инструментов.
5. Выбрано оборудование, с применением которого предполагается проводить комплекс экспериментальных исследований, а также рассмотрены его основные характеристики, что позволит изучить свойства полимерно-абразивных инструментов, производительность процесса обработ-



ки и качество обработанной поверхности при зачистке поверхностей и скруглении острых кромок, температуру в зоне резания, силы резания и износ инструментов.

6. Для исследования влияния режимов обработки на производительность процесса, качество обработанной поверхности, температуру в зоне резания, сил резания и износа инструментов на основе экспериментальных данных обосновано применение методов математической статистики, основанных на планировании эксперимента, дисперсионном и регрессионном анализе.

7. Спроектированы и изготовлены опытные образцы, которые будут использованы для исследования процессов финишной обработки деталей полимерно-абразивными инструментами как на легкодоступных участках деталей, так и на труднодоступных, в том числе в которых представлены возможные сочетания поверхностей, встречающихся на авиационных деталях, в том числе на длинномерных типа профилей.

## **3 Основы технологии зачистки поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами<sup>1</sup>**

Данный раздел (глава) является реализацией системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки полимерно-абразивными инструментами (см. рисунок 2.2). В рамках данной главы производится создание подсистем третьего и четвертого уровней в пространстве состояний (математических моделей): взаимодействия эластичных полимерно-абразивных кругов с обрабатываемой поверхностью, сил взаимодействия, съема материала (производительности процесса), шероховатости обработанной поверхности, температуры в зоне обработки, износа инструмента.

### **3.1 Исследование характеристик эластичных полимерно-абразивных кругов и разработка теоретических положений взаимодействия режущего микрорельефа с обрабатываемой поверхностью**

Характер взаимодействия режущего микрорельефа полимерно-абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью определяет производительность процесса обработки поверхностей и качество обработанной поверхности. Для определения влияния режимных параметров обработки на производительность процесса обработки и шероховатость обработанной поверхности необходимо исследовать: геометрические характеристики и упруго-вязкие свойства полимерно-абразивного инструмента, параметры его режущего микрорельефа, силы взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью, температуру в зоне обработки, износ инструмента, а также съем материала, формирование шероховатости обработанной поверхности и остаточных напряжений в зависимости от режимных параметров обработки.

Для разработки теоретических положений взаимодействия эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью необходимо получить следующую информацию:

- физико-механические свойства обрабатываемого материала;
- характеристики и физико-механические свойства эластичных полимерно-абразивных кругов (жесткость, модуль упругости первого рода, коэффициент Пуассона и параметры режущего микрорельефа);
- показатели внедрения зерен круга в обрабатываемый материал (глубина внедрения, количество зерен, находящихся в контакте и радиус кривизны вершин зерен);
- силы, действующие на обрабатываемую поверхность.

---

<sup>1</sup> Основные результаты данных исследований опубликованы автором лично и в соавторстве в работах [62, 63, 67, 68, 69, 70, 75, 76, 77, 80, 82, 178, 185, 186, 280, 281, 282].

### 3.1.1 Жесткость эластичных полимерно-абразивных кругов

В основу определения жесткости материала эластичных абразивных кругов автором [260] положено отношение упругой реакции обрабатываемой поверхности к упругой деформации круга:  $C_r = \frac{1}{y} \cdot \frac{dP_y}{d\varphi} = const$ ,

где  $y$  – упругое перемещение в направлении оси  $Y$ ;  $\frac{dP_y}{d\varphi}$  – упругая реакция основания в пределах единичного сектора.

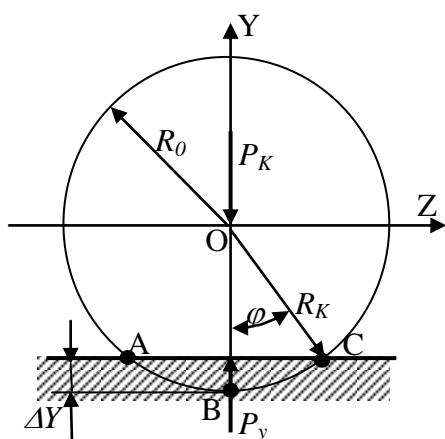
Такой подход к решению жесткостной задачи и определению соответствующей характеристики эластичного полимерно-абразивного круга неприемлем, поскольку противоречит основам теории упругости. Жесткость следует выражать как функцию упругого напряжения в материале эластичного полимерно-абразивного круга:  $C_r = \frac{dP_y}{y \cdot dS}$ ,

где  $dS$  – единичная площадь инструмента, которая находится в контакте с поверхностью обрабатываемой детали.

В связи с этим, для определения жесткости эластичных полимерно-абразивных кругов требуется провести ряд собственных исследований, поскольку она непосредственно влияет на силы, возникающие в процессе обработки, а, следовательно, на производительность процесса обработки и качество обработанной поверхности.

Жесткость единичного элемента площадью  $dS$  эластичного полимерно-абразивного круга в направлении оси  $Y$  (рисунок 3.1) можно выразить в виде уравнения:  $C_r = \frac{dP_y}{\Delta Y \cdot dS}$ , где  $P_y$  – сила, действующая по оси  $Y$  (Н);  $\Delta Y$  – деформация круга (мм).

Для экспериментального определения жесткости на эластичный полимерно-абразивный круг необходимо приложить силу  $P_K$  и измерить его деформацию  $\Delta Y$  (рисунок 3.1). В разных точках прямой  $AC$  деформация круга будет различной. Для определения жесткости круга целесообразно определить средневзвешенную деформацию.



**Рисунок 3.1 – Схема взаимодействия эластичного круга с плоскостью**

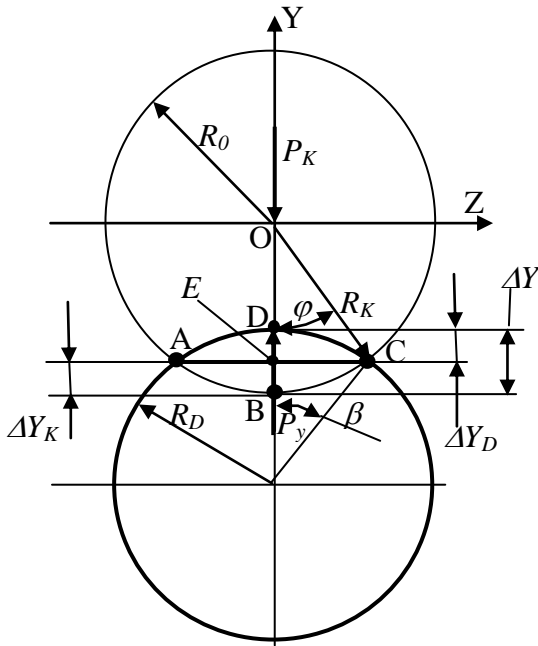
При известной деформации круга  $\Delta Y_K$  для всех случаев контакта круга с различными поверхностями (плоской, наружной цилиндрической, внутренней цилиндрической), угол  $\varphi$  определится как:  $\cos\varphi = 1 - \frac{\Delta Y_K}{R_K}$ .

Для случая контакта круга с плоской поверхностью ( $\Delta Y = \Delta Y_K$ ) средневзвешенная деформация определится как:

$$\Delta Y_c = \frac{S_{сегм}}{AC}, \quad (3.1)$$

где  $S_{сегм}$  – площадь сегмента  $ABC$  (см. рисунок 3.1):

$$S_{сегм} = \frac{R_K^2}{2} \cdot \left( \frac{\pi \cdot \varphi}{90} - \sin 2\varphi \right). \quad (3.2)$$



**Рисунок 3.2 – Схема взаимодействия эластичного круга с наружной цилиндрической поверхностью**

После проведения вычислений, аналогичных случаю контакта эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой плоскостью, определяется жесткость круга для случая контакта круга с наружной цилиндрической поверхностью:

$$C_r = \frac{2P_k}{R_K^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varphi}{90} - \sin 2\varphi\right) + R_D^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \beta}{90} - \sin 2\beta\right)}, \quad (3.5)$$

где угол  $\beta$  определяется по выражению:

$$\sin \beta = \frac{R_K}{R_D} \cdot \sin \varphi.$$

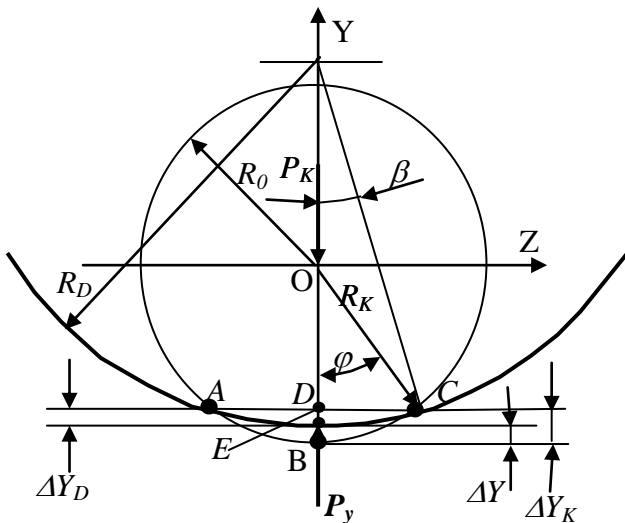
Для случая контакта круга с внутренней цилиндрической поверхностью (рисунок 3.3) средневзвешенная деформация равна:  $Y = \Delta Y_K - \Delta Y_D$ .

Средняя деформация равна:

$$\Delta Y_c = \frac{R_K^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varphi}{90} - \sin 2\varphi\right) - R_D^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \beta}{90} - \sin 2\beta\right)}{4 \cdot R_K \cdot \sin \varphi}.$$

После проведения вычислений, аналогичных вышеприведенным, жесткость эластичного полимерно-абразивного круга (в Н/мм<sup>2</sup>) на единицу его ширины (1 мм) определится по выражению:

$$C_r = \frac{2P_k}{R_K^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varphi}{90} - \sin 2\varphi\right) - R_D^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \beta}{90} - \sin 2\beta\right)}. \quad (3.6)$$



**Рисунок 3.3 – Схема взаимодействия эластичного круга с внутренней цилиндрической поверхностью**

Угол  $\varphi$  здесь в градусах.

$$AC = 2R_K \cdot \sin \varphi. \quad (3.3)$$

Подставив выражения (3.2) и (3.3) в (3.1), получим средневзвешенную деформацию круга:

$$S_{\text{сегм}} = \frac{R_K \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varphi}{90} - \sin 2\varphi\right)}{4 \sin \varphi}.$$

Жесткость круга (в Н/мм<sup>2</sup>) на единицу его ширины (1 мм) равна:

$$C_r = \frac{P_k}{AC \cdot \Delta Y_c} = \frac{2P_k}{\frac{R_K^2}{2} \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varphi}{90} - \sin 2\varphi\right)}. \quad (3.4)$$

Для случая контакта круга с наружной цилиндрической поверхностью ( $\Delta Y = \Delta Y_K + \Delta Y_D$ ) (рисунок 3.2), средневзвешенная деформация определяется по выражению:

$$\Delta Y_c = \frac{R_K^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varphi}{90} - \sin 2\varphi\right) + R_D^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \beta}{90} - \sin 2\beta\right)}{4 \cdot R_K \cdot \sin \varphi}.$$

### Экспериментальное исследование жесткости эластичных полимерно-абразивных кругов

Для проведения экспериментальных исследований были использованы эластичные абразивные круги компании 3М (Minnesota Mining and Manufacturing Company), связкой которых является полимерный материал Scotch-Brite™ (см. рисунки 2.5 – 2.7).

Круги марок FS-WL 8A MED, FS-WL 6S FIN, FS-WL 2S CRS, DB-WL 8S MED и DB-WL 7S FIN (см. рисунки 2.5 – 2.6) – прессованные. Круг марки CF-FB 0,5A FIN (см. рисунок 2.7) – очень эластичная лепестковая щетка, изготовленная из материала Clean & Finish. В обозначении эластичных полимерно-абразивных кругов компании 3М цифрами (8, 7, 6, 2, 0,5) обозначена структура, А – абразивный материал  $Al_2O_3$ , S – абразивный материал SiC, зернистость: FIN (тонкое зерно), MED (среднее зерно), CRS (грубое зерно). Соответствие зернистостей Scotch-Brite™ зернистостям по стандартам FEPA и ГОСТ 3647-80 приведено в таблице 2.1.

Исследованные параметры рассматриваемых в настоящей работе эластичных полимерно-абразивных кругов приведены в таблице 3.1.

**Таблица 3.1 – Параметры эластичных полимерно-абразивных кругов**

Круг	$D_k$ , мм	$B_k$ , мм	$r_k$ , мм	$d_k$ , мм	$M_k$ , кг	$\gamma_k$ , кг/м <sup>3</sup>	Абразив	Зернистость Z, мкм
FS-WL-8AMED	140,5	26	17,5	25,4	0,278	712,77	$Al_2O_3$	50-60
FS-WL-6SFIN	129,5	25,5	17,5	25,4	0,162	501,63	SiC	45-50
FS-WL-2SCRS	147,2	26	17,5	25,4	0,162	377,37	SiC	~100
DB-WL-8SMED	147,8	25,6	17,5	25,4	0,284	666,29	SiC	50-60
DB-WL-7SFIN	145,8	25,5	17,5	25,4	0,232	561,99	SiC	45-50
CF-FB-0,5AFIN	193	50	45	76,5	0,418	339,03	$Al_2O_3$	45-50

$D_k$  – диаметр круга, мм;  $B_k$  – ширина круга, мм;  $r_k$  – радиус втулки круга, мм;  $d_k$  – диаметр отверстия, мм;

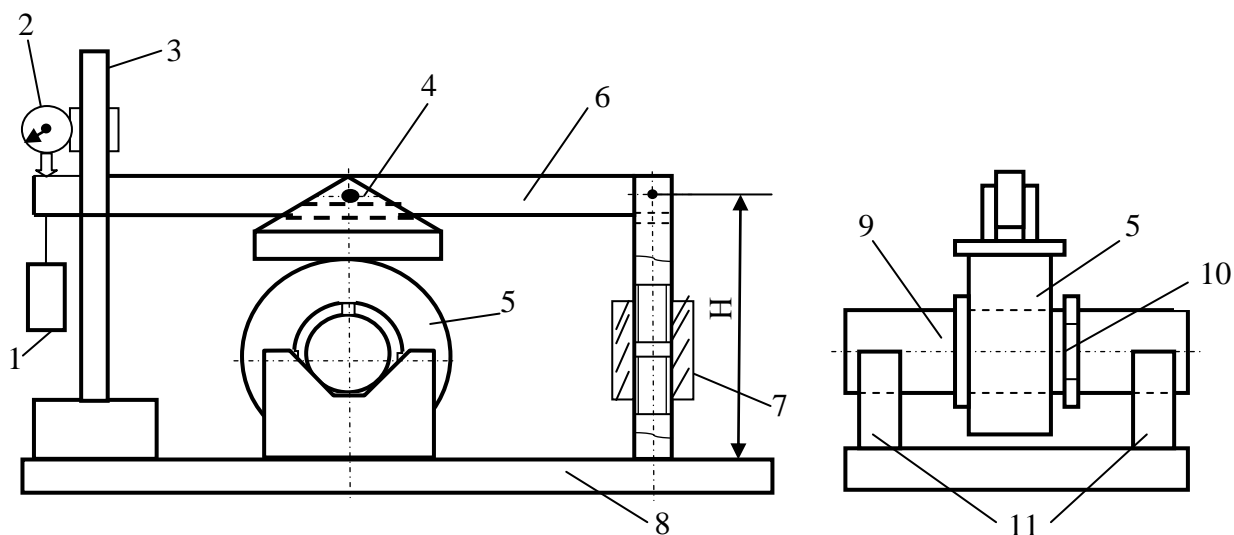
$M_k$  – масса круга, кг;  $\gamma_k$  – плотность материала круга, кг/м<sup>3</sup>.

Поскольку исследуемые круги – маложесткие, а силы деформации небольшие, применить имеющиеся стандартные средства измерения жесткости оказалось невозможно. Имеющиеся в наличии средства для измерения сил и деформации, например универсальная электромеханическая испытательная машина Instron 5982, испытательная машина КСИМ-40, позволяют измерять деформации при силах нагружения от 100Н до 100кН. Эксперименты по определению жесткости исследуемых эластичных полимерно-абразивных кругов необходимо проводить при нагрузках от 19 до 250Н.

Поэтому для экспериментального определения жесткости исследуемых кругов была самостоятельно изготовлена специальная установка, схема которой приведена на рисунке 3.4.

Исследуемый круг 5, закрепляется на оправке 9 с помощью гайки 10 и устанавливается на призмах 11. Под действием груза 1, благодаря рычагу 6 и нагрузочной пяте 4, создается требуемая деформация круга 5, которая регистрируется индикатором 2.

Данный эксперимент был проделан несколько раз с использованием различных масс груза 1.



1 – груз; 2 – индикатор; 3 – штатив; 4 – нагрузочная пята; 5 – круг; 6 – рычаг; 7 – механизм регулировки высоты; 8 – корпус; 9 – оправка; 10 – гайка; 11 – призмы.

**Рисунок 3.4 – Схема установки для исследования жесткости эластичных полимерно-абразивных кругов**

Полученные результаты приведены в таблице 3.2. При помощи дисперсионного анализа с применением критерия Фишера (см. п. 2.5.2) при доверительной вероятности  $P = 0,95$  доказана незначимость влияния деформации круга на его жесткость.

Для проведения дальнейших расчетов, жесткость эластичного полимерно-абразивного круга может быть принята как среднеарифметическая по результатам измерений (см. таблицу 3.2).

**Таблица 3.2 – Результаты исследований жесткости эластичных полимерно-абразивных кругов**

Круг	Сила $P_k$ , Н	Первоначальная деформация		Окончательная деформация				
		$\Delta Y$ , мм	Жесткость $C_r$ , Н/(мм <sup>2</sup> ·мм)	Время, с	$\Delta Y$ , мм	Жесткость $C_r$ , Н/(мм <sup>2</sup> ·мм)		
						измер.	средняя	измер.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
FS-WL-8AMED	39,24	0,37	0,4255	0,4648	46	0,45	0,3166	0,4119
	88,29	0,55	0,5293		35	0,6	0,46314	
	143,775	0,825	0,4679		45	0,95	0,3786	
	192,394	1,05	0,4362		0	1,05	0,4362	
	250,508	1,2	0,4650		0	1,2	0,4650	
FS-WL-6SFIN =	39,24	0,625	0,20556	0,1853	50	0,7	0,17345	0,1643
	88,29	1,175	0,17966		58	1,3	0,15442	
	143,775	1,5	0,20298		0	1,5	0,20298	
	192,394	2,2	0,15317		85	2,5	0,12653	
FS-WL-2SCRS	19,62	0,45	0,15468	0,0993	70	0,55	0,11448	0,0830
	39,24	1,075	0,08389		70	1,25	0,06693	
	88,29	2,05	0,07182		60	2,3	0,06466	
	143,775	2,25	0,10175		75	2,55	0,08439	
	192,394	3,1	0,08434		0	3,1	0,08434	

DB-WL-8SMED	39,24	0,37	0,42077	0,2900	48	0,45	0,3134	0,2286
	88,29	0,8	0,29783		48	0,95	0,2303	
	143,775	1,2	0,26423		60	1,4	0,20953	
	192,394	1,5	0,25315		58	1,7	0,2099	
	250,508	2	0,2143		70	2,25	0,1797	
DB-WL-7SFIN	19,62	0,25	0,3827	0,2764	27	0,3	0,29139	0,2311
	39,24	0,4	0,37826		44	0,45	0,31685	
	88,29	0,825	0,28745		45	0,925	0,24222	
	143,775	1,45	0,20118		60	1,525	0,18655	
	192,394	1,725	0,20758		60	1,9	0,1796	
	250,508	2,1	0,20138		65	2,35	0,17021	
CF-FB-0,5AFIN	19,62	0,85	0,02707	0,0162	64	0,95	0,02292	0,0158
	39,24	2,2	0,01303		64	2,35	0,0118	
	68,67	3,1	0,01365		65	3,32	0,01232	
	88,29	4,2	0,01115		78	4,5	0,01006	

### 3.1.2 Модуль упругости первого рода и коэффициент Пуассона

Модуль упругости первого рода определяется по выражению:  $E = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y}$ ,

где  $\sigma_y$  – напряжения по оси Y;

$\varepsilon_y$  – относительная деформация, которая равна:  $\varepsilon_y = \Delta Y/d$ ;

$d$  – длина деформируемого участка эластичного круга  $d = R_K - r_k$ ;

$r_k$  – радиус втулки (посадочного отверстия) эластичного круга.

Напряжения по оси Y определяются по уравнению:

$$\sigma_y = \frac{dP}{dS} \text{ или } \sigma_y = C_r \cdot \Delta Y = C_r \cdot \frac{R_K \cdot \left(\frac{\pi \varphi}{90} - \sin 2\varphi\right)}{4 \cdot \sin \varphi}.$$

Таблица 3.3 – Результаты определения  $E$  и  $\mu$

Круг	$d$ , мм	$\Delta Y$ , мм	$\varepsilon_y$	$\Delta X$ , мм	$\varepsilon_x$	$\sigma_y$ , Н/мм <sup>2</sup>	$E$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\mu$
FS-WL-8AMED	52,75	1,8	0,034	0,4	0,016	15,908	466,186	0,458
FS-WL-6SFIN	47,25	2,5	0,053	0,15	0,006	5,767	109,005	0,113
FS-WL-2SCRS	56,1	4,6	0,082	0,45	0,018	3,426	41,78	0,216
DB-WL-8SMED	56,4	2	0,035	0,15	0,0059	10,425	293,999	0,165
DB-WL-7SFIN	55,4	2,5	0,045	0,15	0,0059	9,729	215,601	0,131
CF-FB-0,5AFIN	51,5	4,5	0,087	1,8	0,036	0,745	8,528	0,412

Коэффициент Пуассона определяется согласно выражению:  $\mu = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}$ ,

где  $\varepsilon_x$  – относительная деформация по оси X, которая равна:  $\varepsilon_x = \Delta X/B_K$ . Здесь  $\Delta X$  – это увеличение ширины круга под действием груза 1 (см. рисунок 3.4), которая измерялась при помощи штангенциркуля с цифровым отсчетным устройством *Mahr MarCal 16 EW* (с точностью до 0,01 мм).

Деформации  $\Delta Y$  и  $\Delta X$  определялись на специально изготовленной установке, приведенной на рисунке 3.4. Результаты исследований относительной деформации по осям X ( $\varepsilon_x$ ) и Y ( $\varepsilon_y$ ), а также напряжения по оси Y ( $\sigma_y$ ) и коэффициента Пуассона ( $\mu$ ) представлены в таблице 3.3.

### 3.1.3 Микрорельеф режущей поверхности эластичных полимерно-абразивных кругов

При известных размерах зерен, пор и мостиков связки, поверхностные геометрические характеристики абразивного инструмента могут быть теоретически описаны. Например, для шлифовальных кругов такие теоретические положения разработаны в работе [158].

К сожалению, производителем применяемых при исследуемом методе обработки инструментов, такие данные не предоставляются. Принимая во внимание опыт многочисленных исследователей в области абразивной обработки [11, 57, 58, 112, 190, 247], при зачистке поверхностей полимерно-абразивным инструментом целесообразно разработать математические модели рабочей поверхности абразивного инструмента, которая участвует в процессе взаимодействия с обрабатываемой поверхностью, с использованием теории случайных функций. При этом, единственным удовлетворительным способом определения параметров режущей поверхности абразивного зерна следует признать статистическое исследование действительного микрорельефа режущей поверхности эластичных полимерно-абразивных кругов.

В качестве метода получения первичной информации о микрорельефе рабочей поверхности эластичных полимерно-абразивных кругов выбрано профилографирование, которое отличается от других методов простотой и большим объемом получаемой информации.

Принимая во внимание большой опыт оценивания микрорельефа поверхности при помощи случайных функций [57, 58, 128, 203, 254], можно представить микрорельеф эластичного полимерно-абразивного круга в виде случайного стационарного процесса, обладающего эргодическим свойством. Реализацией данного случайного стационарного процесса будет являться профилограмма.

Целесообразно в качестве гипотезы принять то, что исследуемый случайный процесс подчиняется закону нормального распределения, поскольку проверка закона нормального распределения автором [57, 58], согласно критериям согласия Пирсона  $\chi$ , Романовского, а также по эксцессу и асимметрии на абразивных материалах 24А6ПСТ19К1 и 24А25ПСТ18К, полностью подтвердила данную гипотезу.

Для полного описания нормального случайного стационарного процесса необходимо знать только его математическое ожидание  $E(h(x))$  и корреляционную функцию [57, 232]:

$$K(\tau) = \sigma^2 \cdot \rho(\tau),$$

где  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение случайного процесса;  $\rho(\tau)$  – нормированная корреляционная функция;  $\tau$  – расстояние между точками профиля.



Известно [57], что если речь идет о микрорельефе поверхности, то математическое ожидание процесса равно нулю. Следовательно, задача сводится к исследованию аппроксимации корреляционной функции. Воспользовавшись свойством особых точек, согласно [57, 84, 232, 262, 285], получим выражения для определения:

$$\text{числа нулей (пересечений со средней линией): } n(0) = \frac{1}{\pi} \cdot (-\rho^2(0))^{1/2};$$

$$\text{числа максимумов: } m = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(-\frac{\rho^{(4)}(0)}{\rho^{(2)}(0)}\right)^{1/2};$$

$$\text{числа перегибов: } s_p = \frac{1}{\pi} \cdot \left(-\frac{\rho^{(6)}(0)}{\rho^{(4)}(0)}\right)^{1/2}.$$

В данных выражениях  $\rho^{(2)}(0)$ ,  $\rho^{(4)}(0)$ ,  $\rho^{(6)}(0)$  – 2-ая, 4-ая и 6-ая производные нормированной корреляционной функции  $\rho(\tau)$  при  $\tau = 0$  соответственно.

Установив по [57, 203] аппроксимацию нормированной функции корреляции:  $\rho(\tau) = e^{-\alpha \cdot \tau^2} = e^{-[0,5\pi^2 \cdot E^2(n(0)) \cdot \tau^2]}$ , получаем возможность для вычисления требуемых параметров микрорельефа режущей поверхности эластичных полимерно-абразивных кругов (среднеарифметического отклонения профиля, максимальной высоты профиля, относительной опорной длины профиля, радиуса закругления вершин выступов, угла профиля, количества выступов, одновременно находящихся в контакте и т.д.).

На основе всего изложенного, следует сделать вывод о том, что первоначальной задачей, которую необходимо решить с целью получения необходимых параметров режущего микрорельефа эластичных полимерно-абразивных кругов, является профилографирование и получение профилограмм их режущей поверхности. По полученным профилограммам не составляет труда определить: среднее квадратическое отклонение профиля и значения особых точек.

### 3.1.4 Внедрение зерен круга в обрабатываемый материал

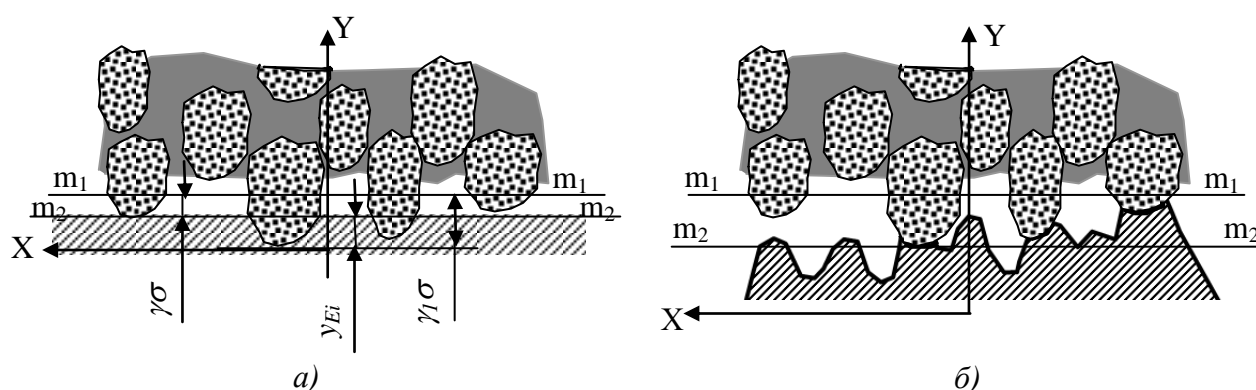
Во время работы, эластичный полимерно-абразивный круг, под действием сил, возникающих в результате его взаимодействия с поверхностью обрабатываемой детали, своим режущим профилем производит сьем материала и формирование таких параметров поверхностного слоя, как шероховатость, остаточные напряжения, наклеп и др.

Для исследования взаимодействия эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью необходимо определить: параметры режущего микрорельефа; силы, действующие на обрабатываемую поверхность; количество зерен, участвующих в процессе обработки, глубину их внедрения в обрабатываемый материал; количество материала, срезаемого эластичным полимерно-абразивным кругом за акт взаимодействия.

Для определения всего вышперечисленного необходима разработка теоретических положений взаимодействия эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью.

Разработку данных теоретических положений удобно начинать с математического описания внедрения абсолютно жесткого микрорельефа в материал, обладающий идеально гладкой плоскостью. Разработав математическую модель на примере такого идеализированного взаимодействия, будет не сложно перенести ее на процесс, который будет более приближен к реальным условиям (обработка эластичным полимерно-абразивным инструментом шероховатой поверхности).

На рисунке 3.5, *a* показан шероховатый профиль в сечении круга, имеющий среднюю линию ( $m_1m_1$ ) в зоне контакта с обрабатываемой идеально гладкой плоскостью (линия  $m_2m_2$ ). В связи с тем, что эластичный полимерно-абразивный круг деформируется, его поверхность, которая находится в контакте с поверхностью обрабатываемой детали, примет ее форму. Для упрощения проводимых решений, необходимо процентрировать случайный процесс относительно средней линии, которая представляется в виде прямой  $m_1m_1$ .



**Рисунок 3.5 – Схема взаимодействия эластичного круга с поверхностью детали:**  
*a* – идеально гладкой; *б* – шероховатой.

Известно, что в теории, закон нормального распределения, которому подчиняется распределение высот микрорельефа, охватывает пределы от  $-\infty$  до  $+\infty$ .

Однако реальное распределение подчиняется усеченному закону. В подобных случаях часто используется так называемое правило  $3\sigma$ . При исследовании взаимодействия режущего микрорельефа эластичного полимерно-абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью, было решено вести начало сближения с расстояния  $4\sigma$ , для повышения точности проводимых вычислений. Значение сближения и расстояние любой точки поверхности  $m_2m_2$  до средней линии микрорельефа  $m_1m_1$  удобнее выразить в относительных величинах  $\gamma = y/\sigma$ .

Подобные рассуждения согласуются с данными работы [58], в которой рассмотрен случай контакта лепесткового круга с обрабатываемой поверхностью.

#### ***Математическое ожидание средней глубины внедрения режущих выступов***

При рассмотрении сближения шероховатого профиля инструмента с идеально гладкой поверхностью,  $m_1m_1$  и  $m_2m_2$  – прямолинейны (см. рисунок 3.5, *a*), а математическое ожидание глубины внедрения пластически деформирующихся материал выступов, т. е. выступов, находя-

щихся ниже относительного уровня сечения  $\gamma \cdot \sigma$ , можно (по аналогии с [57, 58]) записать следующим образом:  $y_E = \sigma \cdot [\gamma_0 - \gamma]$ , (3.7)

где  $\gamma_0$  – математическое ожидание относительных высот максимумов.

$$\gamma_0 = \int_{\gamma}^{\gamma_1} \gamma \cdot f_2(\gamma) \cdot d\gamma. \quad (3.8)$$

В выражении (3.8),  $f_2(\gamma)$  – плотность вероятности распределения относительных высот максимумов  $\gamma$  в пределах сближения:  $f_2(\gamma) = C \cdot f_1(\gamma)$ , (3.9)

где  $C$  – нормирующий множитель, определяемый из следующего условия:

$$C \cdot \int_{\gamma}^{\gamma_1} f_1(\gamma) \cdot d\gamma = 1, \quad (3.10)$$

$f_1(\gamma)$  – плотность вероятности распределения высот для всего предела от  $-\infty$  до  $+\infty$ .

$$\text{Согласно [203]: } f_1(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot [v \cdot \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2v^2}\right) + \sqrt{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \gamma \cdot \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2}\right) \cdot \Phi\left(\frac{\lambda}{2v} \cdot \gamma\right)], \quad (3.11)$$

где  $\lambda = n(o)/m$ ,  $v^2 = 1 - 0,25\lambda$  – параметры микрогеометрии;  $\Phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt$  – функция Лапласа.

$$\text{Подставляя выражения (3.9) и (3.10) в формулу (3.8), получим: } \gamma_0 = \frac{\int_{\gamma}^{\gamma_1} \gamma \cdot f_1(\gamma) \cdot d\gamma}{\int_{\gamma}^{\gamma_1} f_1(\gamma) \cdot d\gamma}. \quad (3.12)$$

Подставив уравнение (3.11) в (3.12), получим:

$$\gamma_0 = \frac{\int_{\gamma}^{\gamma_1} \gamma \cdot [v \cdot \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2v^2}\right) + \sqrt{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \gamma \cdot \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2}\right) \cdot \Phi\left(\frac{\lambda}{2v} \cdot \gamma\right)] \cdot d\gamma}{\int_{\gamma}^{\gamma_1} [v \cdot \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2v^2}\right) + \sqrt{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \gamma \cdot \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2}\right) \cdot \Phi\left(\frac{\lambda}{2v} \cdot \gamma\right)] \cdot d\gamma}. \quad (3.13)$$

Анализ уравнения (3.13) показывает, что математическое ожидание глубины внедрения режущих выступов зависит только от параметра микрорельефа эластичного полимерно-абразивного круга  $\lambda$  и относительного сближения после соприкосновения  $\gamma$ . Данное рассуждение справедливо без учета упругой деформации материала.

**Таблица 3.4 – Значения математического ожидания относительных высот максимумов  $\gamma_0$  в зависимости от параметра микрорельефа  $\lambda = n(o)/m$**

Параметр		$\lambda$			
		0,1	0,6	1,1	1,6
при $\gamma_1=3$	0	0,812	0,922	1,037	1,115
	0,5	1,15	1,227	1,299	1,335
	1	1,53	1,585	1,627	1,64
	1,5	1,941	1,981	2,004	2,007
	2	2,372	2,401	2,413	2,414
	2,5	2,816	2,837	2,842	2,843
	2,8	3,084	3,1	3,103	3,103
	3	3,261	3,273	3,275	3,275
	3,5	3,677	3,681	3,681	3,681
	3,8	3,887	3,888	3,888	3,888

Уравнение (3.13) оказалось невозможно решить путем преобразований через элементарные функции. Поэтому искомые значения были вычислены с использованием ЭВМ с применением численного метода. В таблице 3.4 приведены результаты данных расчетов.

Вычисленные по формуле (3.7) относительные средние глубины внедрения режущих выступов  $y_E/\sigma$  в зависимости от сближения представлены в таблице 3.5.

**Таблица 3.5 – Значения относительных средних глубин внедрения режущих выступов  $y_E/\sigma$  в зависимости от параметра микрорельефа  $\lambda = n(0)/m$**

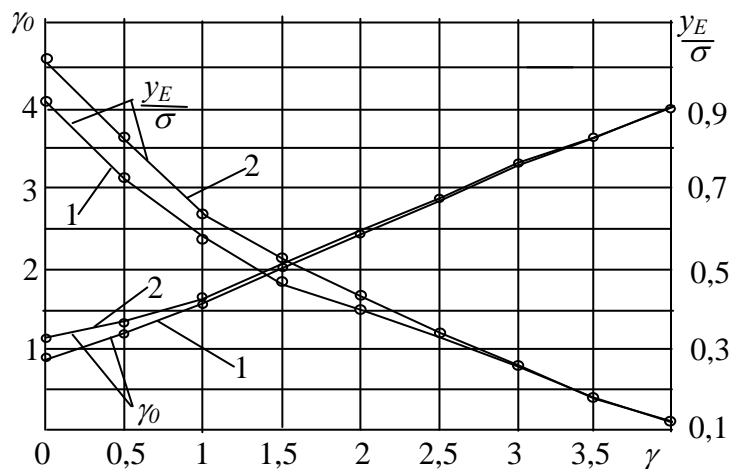
Параметры		$\lambda$			
		0,1	0,6	1,1	1,6
$\gamma$ при $\gamma_1=3$	0	0,812	0,922	1,037	1,115
	0,5	0,65	0,727	0,799	0,835
	1	0,53	0,585	0,627	0,64
	1,5	0,441	0,481	0,504	0,507
	2	0,372	0,401	0,413	0,414
	2,5	0,316	0,337	0,342	0,343
	2,8	0,284	0,3	0,303	0,303
	3	0,261	0,273	0,275	0,275
	3,5	0,177	0,181	0,181	0,181
	3,8	0,087	0,088	0,088	0,088

На рисунке 3.6 представлены полученные путем вышеописанных расчетов зависимости относительных высот максимумов  $\gamma_0$  и относительных средних глубин внедрения режущих выступов  $y_E/\sigma$  от сближения. Данные расчеты проведены без учета упругого деформирования материала эластичных полимерно-абразивных кругов.

Значения, приведенные в таблице 3.4, аппроксимированы уравнением:

$$\gamma_0 = \gamma^{0,802} + 0,97. \quad (3.14)$$

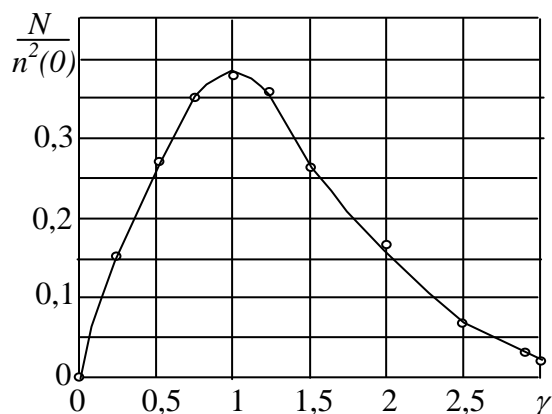
Установлено, что погрешность такой аппроксимации не превышает 7%.



1 – при  $\lambda = 0,6$ ;  
2 – при  $\lambda = 1,6$ .  
**Рисунок 3.6 – Зависимость математического ожидания относительных высот максимумов  $\gamma_0$  и относительной средней глубины внедрения  $y_E/\sigma$  от сближения**

### 3.1.5 Количество зерен эластичного полимерно-абразивного круга, находящихся в контакте

Для случая сближения шероховатого микрорельефа, имеющего плоскую среднюю поверхность, с идеально гладкой плоской поверхностью, Я.А. Рудзитом [203] при нормированной корреляционной функции, которая аппроксимирована выражением  $\rho(\tau) = e^{-\alpha \cdot \tau^2}$ , в случае од-



**Рисунок 3.7 – Зависимость показателя  $N/n^2(0)$  от сближения**

нородного и изотропного поля, получено выражение, которым можно воспользоваться с целью определения среднего числа вершин выступов:

$$N = \frac{\pi \cdot n^2(0)}{2\sqrt{2\pi}} \cdot \gamma \cdot e^{-\frac{\gamma^2}{2}} \text{ или}$$

$$N = 0,6266 \cdot n^2(0) \cdot \gamma \cdot e^{-\frac{\gamma^2}{2}} \quad (3.15)$$

Здесь  $N$  выражается в количестве зерен, находящихся в контакте на площади  $1 \text{ мм}^2$ .

Зависимость показателя  $N/n^2(0)$ , как видно из рисунка 3.7, имеет экстремальный характер с максимумом при  $\gamma = 1$ . Это говорит о том, что число вы-

бросов для случайного поля отличается от выбросов сечения этого поля, которые, в свою очередь, распределяются по монотонно убывающей зависимости.

Для реальных расчетов взаимодействия эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью, сближение  $\gamma$  может колебаться в диапазоне от 1 до 4.

Полученные и обоснованные уравнения математического ожидания средней глубины внедрения режущих выступов и количества зерен эластичного полимерно-абразивного круга, находящихся в контакте, позволяют разработать теоретические обоснования, которые можно использовать для вычисления съема материала и формирования параметров шероховатости обработанной поверхности при обработке поверхностей данной разновидности инструмента.

### 3.1.6 Радиус кривизны вершин выступов

Понятие радиуса кривизны вершин выступов микрорельефа режущей поверхности эластичного полимерно-абразивного круга весьма условно, поскольку реальные микронеровности имеют на своей поверхности субмикронеровности, обусловленные строением твердого тела. Однако для изучения пластического деформирования материала единичной неровностью вполне допустимо пренебречь субмикронеровностями и рассматривать выступы микрорельефа закругленными на вершинах с радиусом  $r_l$ .

Если принять в качестве модели поверхности круга двумерное нормальное случайное изотропное поле, то, в соответствии с [115], математическое ожидание средней приведенной кривизны всех вершин определяется по выражению:  $k_{\text{ср. пр}} = \frac{8\sigma_2}{3\sqrt{\pi}}$ , (3.16)

где  $\sigma_2$  – 2-я производная среднего квадратического отклонения случайного процесса.

$$\text{Согласно [203]: } \sigma_2 = 2\pi^2 \cdot m \cdot n(0) \cdot \sigma. \quad (3.17)$$

Используя выражения (3.16) и (3.17), можно определить математическое ожидание среднего радиуса кривизны вершин:  $r_I = \frac{3\sqrt{\pi}}{16\pi^2 \cdot m \cdot n(0) \cdot \sigma}$ . (3.18)

### 3.1.7 Эквивалентная поверхность

Взаимодействие эластичного полимерно-абразивного круга с идеальной поверхностью, рассмотренное выше, в инженерных расчетах может служить только теоретической основой. Любая поверхность реальных деталей имеет определенную шероховатость, которая, безусловно, изменит характер контакта (см. рисунок 3.5, б).

При пластическом контакте для такого взаимодействия авторами [57, 203] предложены следующие зависимости:

$$\left. \begin{aligned} \text{среднее число нулей ЭП: } n(0)_э &= n(0)_I \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{n(0)_{II} \cdot \sigma_{II}}{n(0)_I \cdot \sigma_I}\right)^2}{1 + \left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_I}\right)^2}}; \\ \text{среднее квадратическое отклонение ЭП: } \sigma_э &= \sqrt{(\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2)}; \\ \text{среднее число максимумов ЭП: } m_э &= m_I \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{m_{II} \cdot n(0)_{II} \cdot \sigma_{II}}{m_I \cdot n(0)_I \cdot \sigma_I}\right)^2}{1 + \left(\frac{n(0)_{II} \cdot \sigma_{II}}{n(0)_I \cdot \sigma_I}\right)^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

В выражениях (3.19) параметры с индексом  $I$  относятся к инструменту, а с индексом  $II$  – к обрабатываемой поверхности.

В случае взаимодействия абразивного зерна с шероховатой обрабатываемой поверхностью, эквивалентный радиус микронеровностей режущей поверхности и шероховатости обрабатываемой поверхности можно рассчитать по уравнению:  $r_э = \frac{r_I r_{II}}{r_I + r_{II}}$ . (3.20)

### 3.1.8 Экспериментальное исследование микрорельефа режущей поверхности эластичных полимерно-абразивных кругов

Для исследования микрорельефа режущей поверхности эластичных полимерно-абразивных кругов целесообразно использовать известные методы, которые применяются для исследования микронеровностей поверхности.

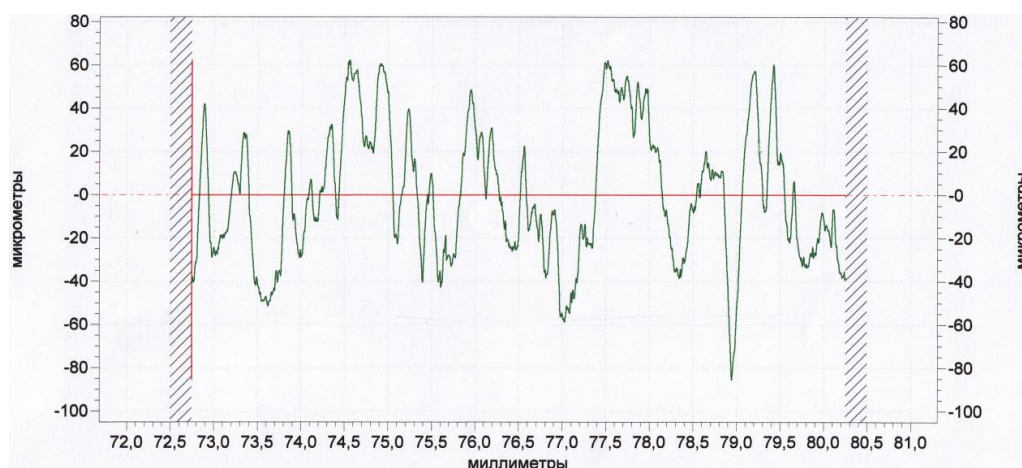
Существует множество методов исследования микронеровностей поверхности, например: интерференционный метод; метод светового сечения и теневой проекции; растровый и рефлектометрический методы, метод слепков; щуповой метод.

Метод ощупывания поверхности иглой является одним из наиболее распространенных способов оценки микрорельефа поверхности. Для исследования микрорельефа режущей по-

верхности эластичных полимерно-абразивных кругов использовался прибор Taylor Hobson Form Talysurf i200 (Великобритания) (см. рисунок 2.23).

Исследование абразивсодержащих материалов на профилографах-профилометрах запрещено, поскольку это приводит к повреждениям индуктивного датчика и выходу профилометра из строя. Поэтому при исследовании режущего микрорельефа были использованы слепки, максимально точно повторяющие микрорельеф режущей поверхности эластичных полимерно-абразивных кругов. Слепки были получены при помощи пластилина, затем они были залиты эпоксидным клеем (получены контрслепки). Параметры режущего микрорельефа определялись по неровностям поверхности контрслепки. На данный способ получения параметров режущего микрорельефа полимерно-абразивного инструмента получен патент на изобретение [75].

Фотографии слепков режущего микрорельефа приведены на рисунке А.1 приложения А. На рисунке 3.8, в качестве примера, приведена полученная предложенным способом профилограмма режущей поверхности эластичного полимерно-абразивного круга DB-WL 8S MED. Для остальных исследованных кругов получены аналогичные профилограммы, которые приведены на рисунке А.2 приложения А.



**Рисунок 3.8 –  
Профилограмма  
режущей поверх-  
ности эластичного  
полимерно-  
абразивного круга  
DB-WL-8S MED**

Необходимо отметить, что реальный режущий микрорельеф отличается от снятого в свободном состоянии из-за деформации эластичности связки. Микрорельеф меняется на протяжении всего периода контакта круга с обрабатываемой поверхностью, поскольку деформация круга за период контакта меняется от 0 до максимального значения. Аналитически определить это изменение оказалось невозможным. К тому же микрогеометрия в процессе работы постоянно меняется в результате самозатачивания и износа. Поэтому, в дальнейших расчетах приняты параметры микрорельефа эластичных полимерно-абразивных кругов, полученные вышеописанным способом (по контрслепку), а некоторые параметры и поправочные коэффициенты определялись экспериментально в зависимости от режимных параметров обработки.

С помощью вышеописанного способа получены следующие параметры режущего микрорельефа исследуемых эластичных полимерно-абразивных кругов:

- $RS$  – средний шаг по вершинам неровностей;
- $RS_m$  – средний шаг (по средней линии);
- $R_q$  – среднее квадратичное отклонение профиля.

Зная данные параметры, не составляет труда определить величины, необходимые для расчета параметров взаимодействия режущего микрорельефа с обрабатываемой поверхностью:

- среднее квадратичное отклонение профиля  $\sigma = R_q$ ;
- числа максимумов  $m = 1/RS$ ;
- числа нулей (пересечений со средней линией)  $n(0) = 2/RS_m$ ;
- отношение  $\lambda = n(o)/m$ .

Все измеренные и рассчитанные параметры режущего микрорельефа эластичных полимерно-абразивных кругов представлены в таблице 3.6

**Таблица 3.6 – Параметры микрорельефа эластичных полимерно-абразивных кругов**

Круг	Зернистость		По прибору			$\sigma$ , мкм	$m$ , мкм <sup>-1</sup>	$n(0)$ , мкм <sup>-1</sup>	$\lambda$
	ЗМ	Средняя, мкм	$RS$ , мкм	$RS_m$ , мкм	$R_q$ , мкм				
FS-WL-8AMED	MEDIUM	55	328,59	1197,52	62,579	62,579	$3,04 \cdot 10^{-3}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$	0,5488
FS-WL-6SFIN	FINE	47,5	302,06	962,4	55,4714	55,4714	$3,31 \cdot 10^{-3}$	$2,08 \cdot 10^{-3}$	0,6277
FS-WL-2SCRS	COARSE	200	510,01	1042,38	85,8067	85,8067	$1,96 \cdot 10^{-3}$	$1,92 \cdot 10^{-3}$	0,9785
DB-WL-8SMED	MEDIUM	55	244,62	681,19	30,9504	30,9504	$4,09 \cdot 10^{-3}$	$2,94 \cdot 10^{-3}$	0,7182
DB-WL-7SFIN	FINE	47,5	274,44	906,53	54,9083	54,9083	$3,64 \cdot 10^{-3}$	$2,21 \cdot 10^{-3}$	0,6853
CF-FB-0,5AFIN	FINE	47,5	310,6	1118,41	74,1072	74,1072	$3,22 \cdot 10^{-3}$	$1,79 \cdot 10^{-3}$	0,5554

Необходимо отметить, что в п. 3.1.3 – 3.1.7 теоретические зависимости математического ожидания глубины внедрения абразивных зерен в обрабатываемый материал, количества зерен, находящихся в контакте, радиуса кривизны вершин выступов рассмотрены применительно к сближению двух микрорельефов без выяснения причин такого сближения и физико-механических свойств материалов взаимодействующих тел.

## **3.2 Математическое моделирование силового взаимодействия эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью**

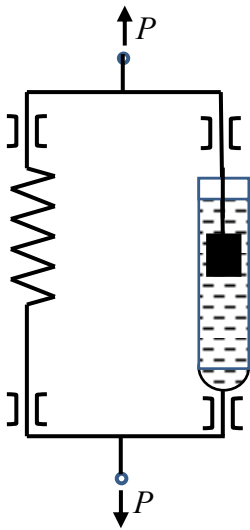
### **3.2.1 Теоретические положения силового взаимодействия эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью**

Силы, возникающие в процессе обработки, оказывают непосредственное влияние на производительность процесса обработки, формирование поверхностного слоя, температуру в зоне резания и износ инструмента.



Рассмотрим возможность теоретического определения нормальной составляющей силы обработки  $P_y$ , которая непосредственно определяет глубину внедрения режущих элементов эластичного полимерно-абразивного круга, а, следовательно, интенсивность съема материала и шероховатость обработанной поверхности.

Нормальная составляющая силы, которая действует перпендикулярно к обрабатываемой поверхности, возникает при взаимодействии вращающегося эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью и состоит из упруго-вязкой (статической) и центробежной (динамической) составляющих.



**Рисунок 3.9 – Модель линейной упруго-вязкой среды, обладающей наследственностью [20]**

### *Упруго-вязкая составляющая силы*

Как показали исследования свойств эластичных полимерно-абразивных кругов, их материалы обладают упруго-вязкими свойствами.

Для эластичного полимерно-абразивного круга в инженерных расчетах целесообразно принять линейные законы напряжений и деформаций. В этом случае, согласно [20], зависимость между напряжением, деформацией и скоростью деформации можно представить выражением:

$$\sigma_n + n_v \cdot \dot{\sigma}_v = E \cdot \varepsilon + \chi \cdot \dot{\varepsilon}_v, \quad (3.21)$$

где  $E$  – модуль упругости материала круга:  $E = C_r \cdot d$ ;

$C_r$  – жесткость материала круга на единице площади;

$\varepsilon$  – относительная деформация круга:  $\varepsilon = \frac{\Delta Y}{d}$ ;  $d$  – длина деформированного участка круга:  $d = R_k - r_k$ ;  $R_k$  – радиус круга;  $r_k$  – радиус втулки (посадочного отверстия) круга;  $\chi$  – коэффициент линейной вязкости вещества;  $\dot{\sigma}_v$  – скорость напряжений при вязкой деформации;  $n_v$  – коэффициент, характеризующий изменение скорости напряжений;  $\dot{\varepsilon}_v$  – скорость вязкой деформации.

Для выражения (3.21) возможно построить модель упруго-вязкого тела (рисунок 3.9), обладающего наследственностью, но не способного к релаксации.

### *Экспериментальное исследование упруго-вязкого восстановления после деформации эластичных полимерно-абразивных кругов*

Исследования проведены при помощи специально изготовленной установки (см. рисунок 3.4) на эластичных полимерно-абразивных кругах компании 3М, основные характеристики которых приведены в таблице 3.1.

Исследуемый круг 5, закрепленный при помощи оправки 9 гайкой 10, устанавливается на призмах 11. Под действием груза 1, с помощью рычага 6 и нагрузочной пяты 4, создается заданная деформация круга 5, которая регистрируется индикатором 2. После снятия груза 1, упруго-

вязкое восстановление круга в течение времени фиксируется при помощи индикатора 2 путем высокоскоростной (30 кадров в секунду) съемки.

Полученные результаты представлены в таблице 3.7.

**Таблица 3.7 – Результаты исследований упруго-вязких свойств кругов**

Круг	Испытание при деформации $\Delta Y$ , мм	Время восстановления после деформирования $t_B$ , с				
		0,033	0,066	0,099	0,133	0,166
		Деформация восстановления $\delta_{yB}$ , мм				
FS-WL-8AMED	1,5; 2	0,028	0,15	0,35	0,53	0,68
FS-WL-6SFIN	1,5; 2	0,10	0,75	1,41	2,08	-
FS-WL-2SCRS	1,5; 2; 3	0,043	0,52	1,04	1,52	2,00
DB-WL-8SMED	1,5; 2	0,035	0,30	0,55	0,83	1,09
CF-FB-0,5AFIN	3; 4; 5	0,099	0,80	1,46	2,15	2,81

В результате проведенных исследований, получены зависимости деформации упруго-вязкого восстановления эластичных полимерно-абразивных кругов от времени:

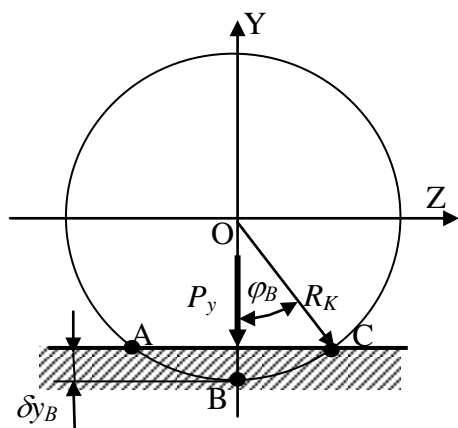
$$\delta_{yB} = a \cdot t_B + b. \quad (3.22)$$

Значения коэффициента и свободного члена уравнения (3.22) приведены в таблице 3.8.

**Таблица 3.8 – Значения коэффициента и свободного члена в (3.22)**

Деформация $\Delta Y$ , мм	Марка круга									
	FS-WL-8AMED		FS-WL-6SFIN		FS-WL-2SCRS		DB-WL-8SMED		CF-FB-0,5AFIN	
	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$
1	5,0	-0,125	7,3	-0,22	7,95	-0,247	4,2	-0,128	-	-
1,5	7,939	-0,162	16,8	-0,374	15,2	-0,482	7,6	-0,21	-	-
2	5,1	-0,143	16,69	-0,45	18,25	-0,547	7,6	-0,21	-	-
2,5	-	-	-	-	15,2	-0,482	-	-	-	-
3	-	-	-	-	9,8	-0,303	-	-	19,5	-0,433
3,5; 4; 4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	18,28	-0,383

В соответствии со схемой взаимодействия эластичного полимерно-абразивного круга с плоскостью (рисунок 3.10), усредненное упруго-вязкое восстановление определяется по выражению:



**Рисунок 3.10 – Схема взаимодействия эластичного круга с обрабатываемой поверхностью**

$$\delta_{yBc} = \frac{R_K \cdot (\frac{\pi \cdot \varphi_B}{90} - \sin 2\varphi_B)}{4 \sin \varphi_B}.$$

При известной деформации, восстановления круга  $\delta_{yB}$ , угол  $\varphi_B$  определится по выражению:  $\cos \varphi_B = 1 - \frac{\delta_{yB}}{R_K}$ .

Относительная деформация круга при упруго-вязком восстановлении равна:  $\varepsilon_B = \frac{\delta_{yBc}}{d}$ .

Скорость деформации упруго-вязкого восстановления после разгрузки:  $\dot{\varepsilon}_B = \frac{\varepsilon_B}{t_B}$ .

Увеличение напряжения при упруго-вязком восстановлении:  $\sigma_B = -C_r \cdot d \cdot \varepsilon_B$ ,  
где  $C_r$  – жесткость материала круга.

Коэффициент линейной вязкости материала круга:

$$\chi = \frac{\sigma_B}{\dot{\varepsilon}_B}$$

При заданной первоначальной деформации круга  $\Delta Y$ , средневзвешенная деформация определяется по выражению:

$$\Delta Y_c = \frac{R_K \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varphi}{90} - \sin 2\varphi\right)}{4 \sin \varphi},$$

где угол  $\varphi$ , по аналогии с рисунком 3.1, определится как:  $\cos \varphi = 1 - \frac{\Delta Y}{R_K}$ .

Напряжение в зоне контакта круга с обрабатываемой поверхностью в соответствии с уравнением (3.21):

$$\sigma_H = C_r \cdot d \cdot \varepsilon + \chi \cdot \dot{\varepsilon}_B - n_B \cdot \dot{\sigma}_B,$$

где  $\varepsilon$  – относительная средневзвешенная деформация круга:  $\varepsilon = \frac{\Delta Y_c}{d}$ ;

$\dot{\sigma}_B$  – скорость напряжений при вязкой деформации, которая определяется по формуле:  $\dot{\sigma}_B = \frac{\sigma_B}{t_B}$ .

Коэффициент, характеризующий изменение скорости напряжений  $n_B$ , зависит от параметров обработки (деформации круга  $\Delta Y$ , скорости резания  $V$  и подачи  $S$ ). Значение данного коэффициента определено экспериментально и представлено выражением:

$$n_B = (d_1 \cdot V^2 + d_2 \cdot V + d_3) \cdot (d_4 \cdot \Delta Y^2 + d_5 \cdot \Delta Y + d_6) \cdot (d_7 \cdot S^2 + d_8 \cdot S + d_9). \quad (3.23)$$

В уравнении (3.23):  $\Delta Y$  в мм,  $V$  в м/с,  $S$  в мм/мин. Значения коэффициентов и свободных членов уравнения (3.23) приведены в таблице 3.9.

Так как напряжение в материале круга  $\sigma_H$  во время его взаимодействия с обрабатываемой поверхностью остается неизменным, в соответствии с выражением (3.21), упругая составляющая силы по оси  $Y$  будет равна:  $P_{yn} = \sigma_H \cdot S_B$ ,  
где  $S_B$  – площадь контакта круга с обрабатываемой поверхностью после упруго-вязкого восстановления.

**Таблица 3.9 – Значения коэффициентов и свободного члена в (3.23)**

Коэффициент	FS-WL 8A MED	FS-WL 6S FIN	FS-WL 2S CRS	DB-WL 8S MED	CF-FB 0,5A FIN
$d_1$	$8,739 \cdot 10^{-4}$	0,0102358	0,020298	0,154432	0,01215
$d_2$	-0,2722	-0,159082	-0,232314	-3,04045	-0,287834
$d_3$	0,03734	0,66605	0,61454	14,2756	1,7478
$d_4$	-6,70369	19,6414	1,153	4,6666	0,125
$d_5$	15,0926	-62,2897	-3,4349	-11,9281	-0,1101
$d_6$	-6,55554	50,2414	2,381	8,3923	-0,5596
$d_7$	$-2,013 \cdot 10^{-7}$	$-5,901 \cdot 10^{-7}$	$-4,6556 \cdot 10^{-6}$	$7,088 \cdot 10^{-8}$	$-1,0486 \cdot 10^{-6}$
$d_8$	$3,153 \cdot 10^{-4}$	$1,015 \cdot 10^{-4}$	$5,70758 \cdot 10^{-3}$	$-5,4287 \cdot 10^{-4}$	$-2,8299 \cdot 10^{-3}$
$d_9$	0,96241	0,9968	0,336694	1,06938	1,3856

Поскольку ширина контакта круга с обрабатываемой поверхностью меняется в зависимости от условий обработки, целесообразно вести расчеты для единицы ширины (1 мм). В этом случае площадь контакта круга с обрабатываемой поверхностью после упруго-вязкого восстановления определится по уравнению:  $S_b = 2 \cdot R_k \cdot \sin \varphi_b$ .

### ***Центробежная составляющая силы***

Для вычисления центробежной составляющей силы, действующей на обрабатываемый материал, необходимо определить объем упруго деформированного материала эластичного полимерно-абразивного круга. При деформации круга на величину  $\Delta Y$ , часть массы материала круга, находится в упруго-деформированном состоянии (см. рис. 3.12) и способна восстановиться в прежнее состояние в пределах упругой деформации. В соответствии с работой [20], эта масса при вращении создает центробежную силу:  $P_{ц} = \frac{m_d \cdot v_{ц}^2}{R_{ц}}$ , (3.25)

где  $m_d$  – масса деформированного материала круга, кг.

$$m_d = \gamma_k \cdot S_{пл},$$

где  $S_{пл}$  – объем упруго деформированного материала круга, который численно равен площади на 1 мм его ширины, м<sup>3</sup>.

В уравнении (3.25),  $v_{ц}$  – скорость вращения центра тяжести деформированного материала круга, м/с;  $\gamma_k$  – плотность материала круга, кг/м<sup>3</sup>.

$$v_{ц} = \frac{\pi \cdot n \cdot R_{ц}}{30},$$

где  $R_{ц}$  – расстояние от центра круга до центра тяжести, м;  $n$  – частота вращения круга, об/мин.

### ***Определение объема упруго деформированного материала круга***

Для нахождения объема деформированного материала эластичного полимерно-абразивного круга, целесообразно воспользоваться известным решением задачи о сосредоточенной силе, приложенной к точке прямолинейного края полу-бесконечной пластинки из теории упругости [20].

Доказано [20], что при проведении окружности произвольного диаметра  $d$ , которая касается верхнего края в точке приложения внешней силы (рисунок 3.11), то для всех точек этой окружности радиальные напряжения будут одинаковы и равны:  $\sigma_r = -\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d}$ , (3.26)

где  $P$  – сосредоточенная вертикальная погонная сила.

На обрабатываемый материал действуют силы, пропорциональные деформации круга. В точке А (рисунок 3.12) создается наибольшее напряжение, которое пропорционально деформации  $\delta_{уб}$ . При этом размер  $d$  может быть не более  $d = R_k - r_k - \delta_{уб}$ .

По уравнению (3.26), напряжение  $\sigma_r$  в точке G, как показал расчет, бесконечно мало. В точках М и N деформации круга равны нулю, а, следовательно, равны нулю и напряжения. Объем деформированного материала ограничен кривой, которая показана на рисунке 3.12

штриховой линией. Принимаем, что величины отрезков DF и AG пропорциональны величинам отрезков DC и AB при любом текущем значении угла  $\varphi_1$

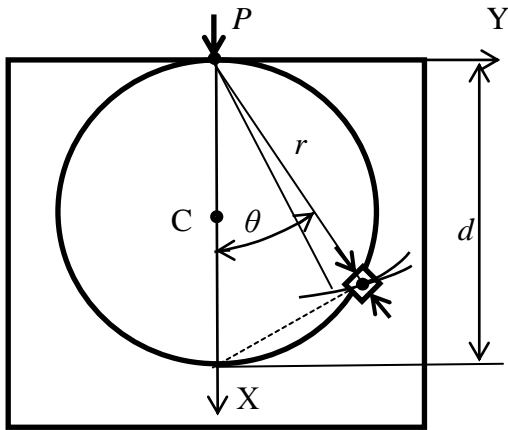


Рисунок 3.11 – Линии равных радиальных напряжений

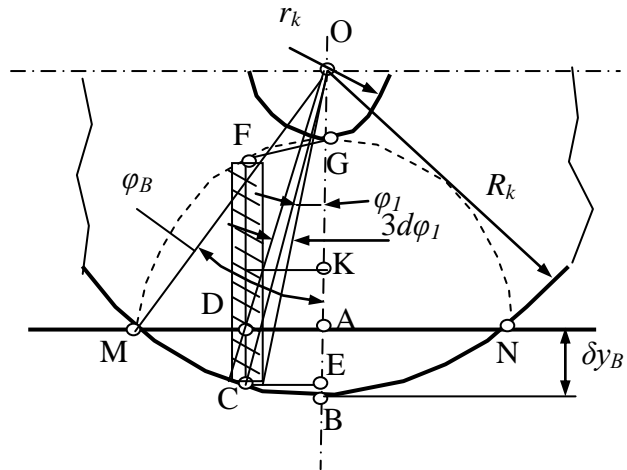


Рисунок 3.12 – Схема к расчету площади деформированного материала круга

При этом деформация круга CD определится по выражению:  $CD = \delta_{y_B} - R_k(1 - \cos\varphi_1)$ .

Тогда:

$$DF = -\frac{d \cdot [\delta_{y_B} - R_k(1 - \cos\varphi_1)]}{\delta_{y_B}},$$

$$CF = DF + CD = \frac{d \cdot [\delta_{y_B} - R_k(1 - \cos\varphi_1)]}{\delta_{y_B}} + [\delta_{y_B} - R_k \cdot (1 - \cos\varphi_1)]. \quad (3.27)$$

После преобразования выражения (3.27), получим:

$$CF = \left[ \frac{d}{\delta_{y_B}} + 1 \right] \cdot [\delta_{y_B} - R_k \cdot (1 - \cos\varphi_1)], \quad (3.28)$$

где  $d = R_k - r_k - \delta_{y_B}$ .

Элементарная площадь  $ds$ , заштрихованная на рисунке 3.12, определяется по уравнению:

$$ds = \left[ \frac{d}{\delta_{y_B}} + 1 \right] \cdot [\delta_{y_B} - R_k \cdot (1 - \cos\varphi_1)] \cdot R_k \cdot d\varphi_1.$$

Площадь деформированного материала круга ( $S_{пл}$ ) определится как:

$$S_{пл} = \int_0^{\varphi_B} \left[ \frac{d}{\delta_{y_B}} + 1 \right] \cdot [\delta_{y_B} - R_k \cdot (1 - \cos\varphi_1)] \cdot R_k \cdot d\varphi_1,$$

где  $\cos\varphi_B = \frac{\delta_{y_B}}{R_k}$  (см. рисунок 3.12).

После преобразования и интегрирования, получается выражение:

$$S_{пл} = 2 \cdot R_k \cdot [A \cdot \varphi + B \cdot \varphi],$$

где  $A = (d + \delta_{y_B}) \cdot \left( 1 - \frac{R_k}{\delta_{y_B}} \right)$ ;  $B = R_k \cdot \left( 1 + \frac{d}{\delta_{y_B}} \right)$ .

Расстояние от центра круга до центра тяжести  $R_{ц}$  определится из уравнения:  $R_{ц} = \frac{M}{S_{пл}}$ ,

где  $M$  – момент площади деформированного участка круга.  $dM = R_i \cdot dS$ ,

$$M = 2 \cdot \int_0^{\varphi_B} CF \cdot R_i \cdot R_k \cdot d\varphi_1, \quad (3.29)$$

где  $R_i$  – расстояние от центра круга до центра тяжести элементарного участка площадью  $dS$ :

$$R_i = \frac{R_k - 0,5 \cdot (A + B \cdot \cos \varphi_1) - R_k \cdot (1 - \cos \varphi_1)}{\cos \varphi_1}. \quad (3.30)$$

Подставляя выражения (3.28) и (3.30) в (3.29), получается уравнение:

$$M = 2 \cdot R_k \cdot \int_0^{\varphi_B} [A \cdot R_k - A \cdot B + B \cdot (R_k - \frac{1}{2}B) \cdot \cos \varphi_1 - \frac{1}{2}A^2 \cdot \frac{1}{\cos \varphi_1}] \cdot d\varphi_1.$$

Таким образом, следует констатировать, что определены все данные, необходимые для расчета центробежной составляющей силы по формуле (3.25).

В результате, составляющая силы, действующая по оси Y:  $P_y = P_{yn} + P_{ц}$ ,

где  $P_{yn}$  – упругая составляющая силы, вычисляемая по формуле (3.24),  $P_{ц}$  – центробежная составляющая силы, определяемая по формуле (3.25).

### ***Тангенциальная составляющая***

В соответствии с теоретическими обоснованиями, описывающими взаимодействие единичного абразивного зерна с обрабатываемым материалом и приведенными в работе [57], нормальная  $P_y^I$  и тангенциальная  $P_z^I$  составляющие силы резания на единичном зерне определяются по выражениям:  $P_y^I = K \cdot r_э^2 \cdot f_y$ ;  $P_z^I = K \cdot r_э^2 \cdot f_z$ , (3.31) где  $K$  – предел текучести на сдвиг;  $r_э$  – эквивалентный радиус микронеровностей режущей поверхности и шероховатости обрабатываемой поверхности (3.20);  $f_y$  и  $f_z$  – безразмерные коэффициенты сил, формулы для расчета которых приведены в аппроксимированном виде в работе [57]:

$$f_y = 14,387 \cdot \varepsilon_E^{0,895}; f_z = 7,1 \cdot \varepsilon_E, \quad (3.32)$$

где  $\varepsilon_E$  – относительная величина внедрения зерен:  $\varepsilon_E = y_E / r_э$ ;

$y_E$  – математическое ожидание глубины внедрения абразивных зерен в обрабатываемый материал (3.7).

Из выражений (3.31) и (3.32), зная значение  $P_y$ , можно определить значение  $P_z$  по выражению:  $P_z = P_y \cdot 0,4915 \varepsilon_E^{0,105}$ .

### ***Аналитическое определение сил резания***

Как было отмечено при расчете тангенциальной составляющей силы, нормальная  $P_y^I$  и тангенциальная  $P_z^I$  составляющие силы резания на единичном зерне определяется по формуле (3.31), где  $f_y$  и  $f_z$  – безразмерные коэффициенты сил. При коэффициенте пластического трения  $\mu_T = 0,5$ :

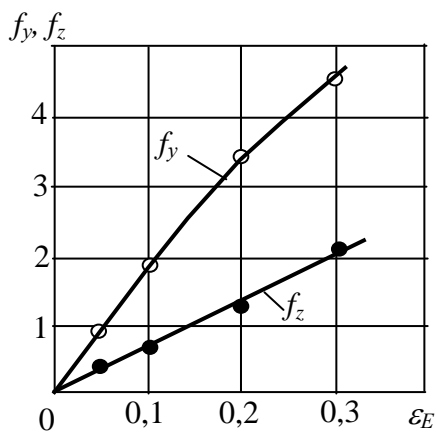
$$f_y = \pi(D_G + A_G - 0,5\pi \cdot \sin^2 \varphi_G); f_z = 2(1 + 2\pi) \cdot A_G - 0,5B_G + 1 - \cos \varphi_G.$$

Здесь  $A_G = A_E = 0,5 \varphi_E - 0,25 \cdot \sin 2 \varphi_E$ ;  $\varphi_G = \varphi_E = \arccos(1 - \varepsilon_E)$ ;  $\varepsilon_E = y_E / r_э$ ;

$$D_G = (5 - \varphi_G) \cdot \sin^2 \varphi_G; B_G = \varphi_G^2 \cdot \sin 2 \varphi_G - 0,5 \cdot \cos 2 \varphi_G.$$

На рисунке 3.13 приведены результаты расчета значений  $f_y$  и  $f_z$  по приведенным формулам в зависимости от относительной глубины внедрения  $\varepsilon_E = y_E / r_э$ .

Для упрощения расчета данных коэффициентов, проведена аппроксимация выражениями (3.32). Погрешность данной аппроксимации не превышает 5%.



**Рисунок 3.13 – Зависимость  $f_y$  и  $f_z$  от  $\varepsilon$**

При контакте инструмента с обрабатываемой поверхностью силы, действующие со стороны инструмента ( $P_{yn}$  и  $P_u$ ), и нормальная составляющая силы резания  $P_y$  равны между собой:  $P_{yn} + P_u = P_y$ .

$$P_y = K \cdot r_{\text{Э}}^2 \cdot f_y \cdot N \cdot L_k. \quad (3.33)$$

Подставив в выражение (3.33) уравнения (3.7), (3.14), (3.15) и (3.32) и заменив в уравнении (3.32)  $\varepsilon_E$  значением  $\varepsilon_E = y_E/r_{\text{Э}}$ , получим:

$$P_{yn} + P_u = K \cdot r_{\text{Э}}^2 \cdot L_k \cdot \left( 0,6266 \cdot n^2(0) \cdot \gamma \cdot e^{-\left(\frac{\gamma^2}{2}\right)} \right) \cdot 14,387 \cdot \left\{ \frac{\sigma_a}{r_{\text{Э}}} \cdot [\gamma^{0,802} + 0,97 - \gamma] - \frac{\nu}{r_{\text{Э}}} \right\}^{0,895}.$$

Если допустить, что значения параметров микрогеометрии обрабатываемой поверхности детали существенно меньше значений параметров режущей поверхности, то в практических расчетах радиус закругления вершин  $r_{\text{Э}}$  следует определять без учета шероховатости обрабатываемой поверхности, то есть:  $r_{\text{Э}} = r_I$ , где  $r_I$  – математическое ожидание среднего радиуса кривизны вершин выступов режущего микрорельефа эластичного полимерно-абразивного круга, определяемое по (3.18).

При этом силы, которые действуют со стороны круга на обрабатываемую поверхность, определяются по выражениям (3.24), (3.25).

### 3.2.2 Экспериментальное исследование сил резания при обработке плоских поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами

Прежде чем приступить к экспериментальным исследованиям сил резания, производительности процесса обработки, качества обработанной поверхности, износа инструмента, температуры в зоне резания в зависимости от режимных параметров обработки, проведена серия пробных экспериментов.

Установлено, что для рассматриваемых эластичных полимерно-абразивных кругов при обработке деталей из алюминиевых сплавов рекомендуются следующие допустимые режимы обработки:

- для кругов FS-WL 8A MED, FS-WL 6S FIN, DB-WL 8S MED: деформация ( $\Delta Y$ ) 0,5–2 мм, скорость ( $V$ ) 200–700 м/мин, подача ( $S$ ) 42–395 мм/мин;
- для круга FS-WL 2S CRS: деформация ( $\Delta Y$ ) 1–3 мм, скорость ( $V$ ) 250–1000 м/мин, подача ( $S$ ) 42–395 мм/мин;
- для круга CF-FB 0,5A FIN: деформация ( $\Delta Y$ ) 3–4,5 мм, скорость ( $V$ ) – 250–1000 м/мин, подача ( $S$ ) 42–395 мм/мин.

При деформации круга, скорости резания и подаче меньше вышеуказанных минимальных значений – процесс обработки не целесообразен по производительности. При увеличении дефор-

мации больше установленных пределов – у более жестких кругов (марок FS-WL 8A MED, FS-WL 6S FIN, DB-WL 8S MED) начинается «намазывание» полимерной связки на обрабатываемую поверхность. У менее жестких (марок FS-WL 2S CRS, CF-FB 0,5A FIN) – интенсивное разрушение поверхностного слоя. При больших скоростях происходит оплавление связки.

Применение охлаждения СОТС не рассматривается, поскольку применение данных инструментов возможно на промышленных роботах, на рабочих местах с использованием ручных шлифмашинок и других случаях, при которых подача СОТС не предусмотрена.

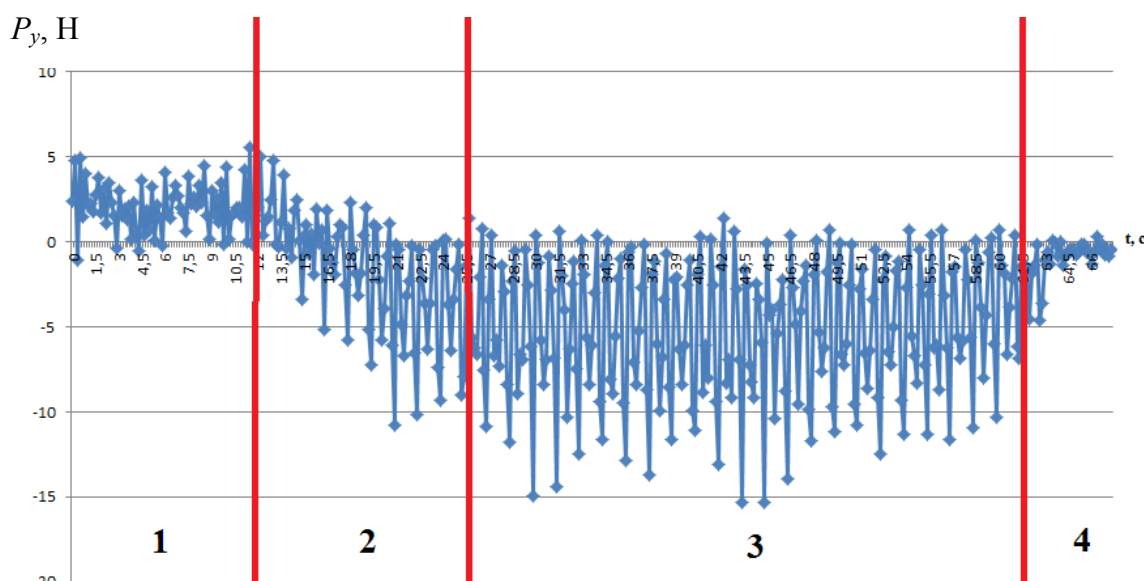
Комплекс экспериментов по исследованию сил резания был проведен при помощи универсально-фрезерного станка марки Deckel Maho DMC 635V (см. рисунок 2.17) с использованием трехкомпонентного динамометра фирмы Kistler (Швейцария) модели 9253B23 (см. рисунок 2.25).

В качестве примера, на рисунке 3.14, приведен график значений показаний динамометра для круга CF-FB-0,5AFIN при  $V = 606,33$  м/с,  $\Delta Y = 4,5$  мм,  $S = 130$  мм/мин.

В связи со значительным разбросом экспериментальных данных, был проведен дисперсионный анализ зависимостей сил от режимных параметров обработки по всем исследуемым кругам по методике, изложенной в работе [199]. При этом число значений исследуемого фактора  $\Delta Y$ ,  $V$  и  $S$  принято  $k = 4$ , число повторных наблюдений на каждом уровне принято  $n = 6$ . Каждое наблюдение является среднеарифметическим значением 30 измеренных показаний.

В таблице 3.10 в качестве примера приведены результаты дисперсионного анализа зависимостей для двух кругов при доверительной вероятности 0,95:

- CF-FB-0,5AFIN (с наименьшей жесткостью)  $P_y = f(\Delta Y)$  при  $V = 606,3$  м/мин;  $S = 130$  мм/мин;  $P_y = f(V)$  при  $\Delta Y = 4,5$  мм;  $S = 130$  мм/мин и  $P_y = f(S)$  при  $\Delta Y = 4,5$  мм;  $V = 606,3$  м/мин;
- FS-WL 8A MED (с наибольшей жесткостью)  $P_y = f(\Delta Y)$  при  $V = 441,4$  м/мин;  $S = 130$  мм/мин;  $P_y = f(V)$  при  $\Delta Y = 1,5$  мм;  $S = 130$  мм/мин и  $P_y = f(S)$  при  $\Delta Y = 1,5$  мм;  $V = 441,4$  м/мин.



В зоне 1 процесс резания не начал; в зоне 2 – врезание; в зоне 3 (урезанной) – процесс резания; в зоне 4 – выход.

**Рисунок 3.14 – График результатов измерения силы  $P_y$  для круга CF-FB-0,5AFIN при  $V = 606,33$  м/мин,  $\Delta Y = 4,5$  мм,  $S = 130$  мм/мин.**



Заключение о значимости или незначимости влияния рассматриваемого фактора  $\Delta Y$ ,  $V$  и  $S$  на силу  $P_y$  получено с использованием критерия Фишера. Если  $F = (S_A^2/S_0^2) > F_{0,95}$ , то фактор значимо влияет на исследуемую силу. (см. п. 2.5.2).  $F_{0,95}$  – критерий Фишера при доверительной вероятности 0,95. Этот критерий при степенях свободы  $f_1 = k - 1 = 3$  и  $f_2 = k(n - 1) = 20$  по справочным данным [199] равен  $F_{0,95} = 3,1$ .

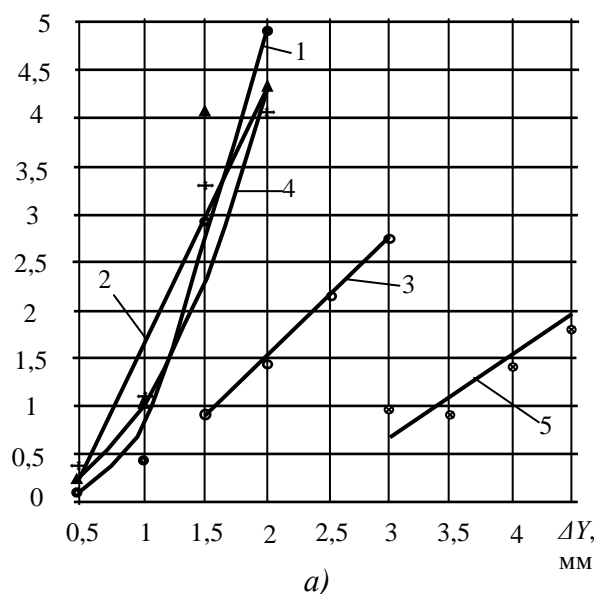
Доверительные границы определены как  $\pm S_0 \cdot t$ , где  $t$  – квантиль Стьюдента. При количестве степеней свободы 179:  $t = 1,96$ .

**Таблица 3.10 – Результаты дисперсионного анализа зависимостей**

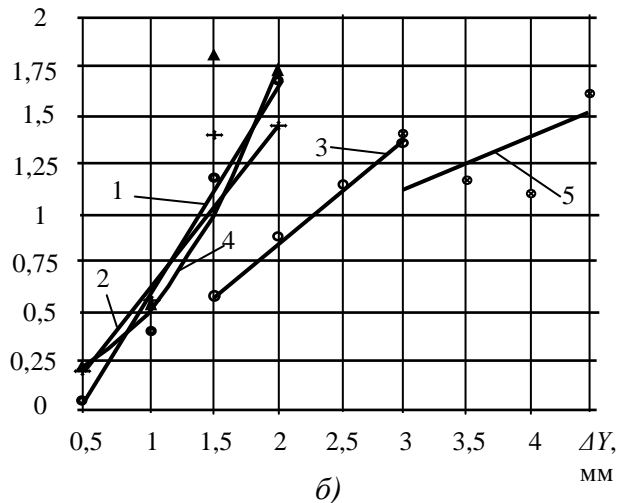
Марка круга	Функция	$S_A^2, Н^2$	$S_0^2, Н^2$	$F=S_A^2/S_0^2$	Значимость влияния фактора	Доверительные границы $S_0 \cdot t, Н$
CF-FB-0,5AFIN	$P_y = f(\Delta Y)$	0,0808	0,00388	20,825	значимо	$\pm 0,122$
	$P_y = f(V)$	0,00368	0,000572	6,442	значимо	$\pm 0,047$
	$P_y = f(S)$	0,0226	0,00097	23,3	значимо	$\pm 0,002$
FS-WL 8A MED	$P_y = f(\Delta Y)$	29,5786	0,112285	263,4248	значимо	$\pm 0,658$
	$P_y = f(V)$	19,5593	0,240155	81,144	значимо	$\pm 0,960$
	$P_y = f(S)$	1,97549	0,064104	30,817	значимо	$\pm 0,125$

На рисунке 3.15 приведены зависимости нормальной (а) и тангенциальной (б) составляющей силы резания (на 1 мм ширины обработки) от деформации круга. В качестве результата измерения при заданных режимах обработки принята средняя арифметическая по всем 6-ти уровням (180 значений).

$P_y, Н$



$P_z, Н$



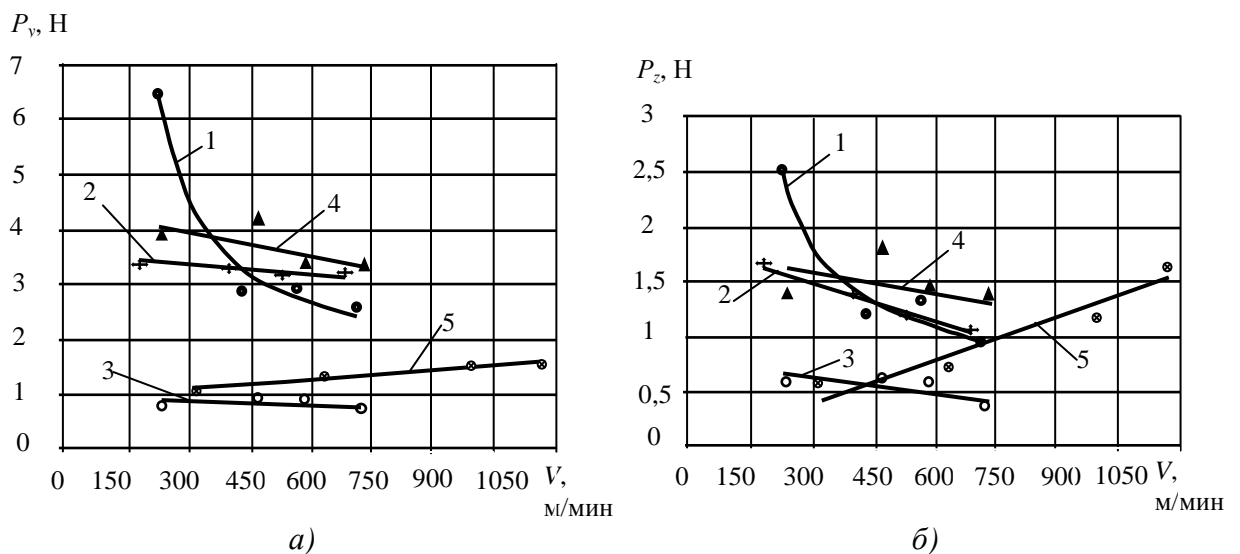
- 1 • – FS-WL 8A MED при  $V = 441,4$  м/мин; 2  $\rightarrow$  FS-WL 6S FIN при  $V = 406,8$  м/мин;  
 3 ○ – FS-WL 2S CRS при  $V = 462,4$  м/мин; 4 ▲ – DB-WL 8S MED при  $V = 464,3$  м/мин;  
 5 ⊗ – CF-FB 0,5A FIN при  $V = 606,3$  м/мин.

**Рисунок 3.15 – Зависимость нормальной  $P_y$  (а) и тангенциальной  $P_z$  (б) составляющей силы резания в расчете на 1 мм ширины обработки от деформации  $\Delta Y$  для кругов при  $S = 130$  мм/мин**

Установлено, что нормальная и тангенциальная составляющие силы с увеличением деформации увеличивается. Это объясняется тем, что с увеличением деформации увеличиваются упругая и центробежная составляющие силы  $P_y$ . По этой же причине увеличивается и тангенциальная сила резания  $P_z$ .

На рисунке 3.16 представлены зависимости нормальной (а) и тангенциальной (б) составляющей силы резания от скорости резания, из которых видно, что с ростом скорости резания значения составляющих силы резания для разных кругов изменяются неоднозначно. Это объясняется слишком разной структурой и жесткостью исследованных кругов.

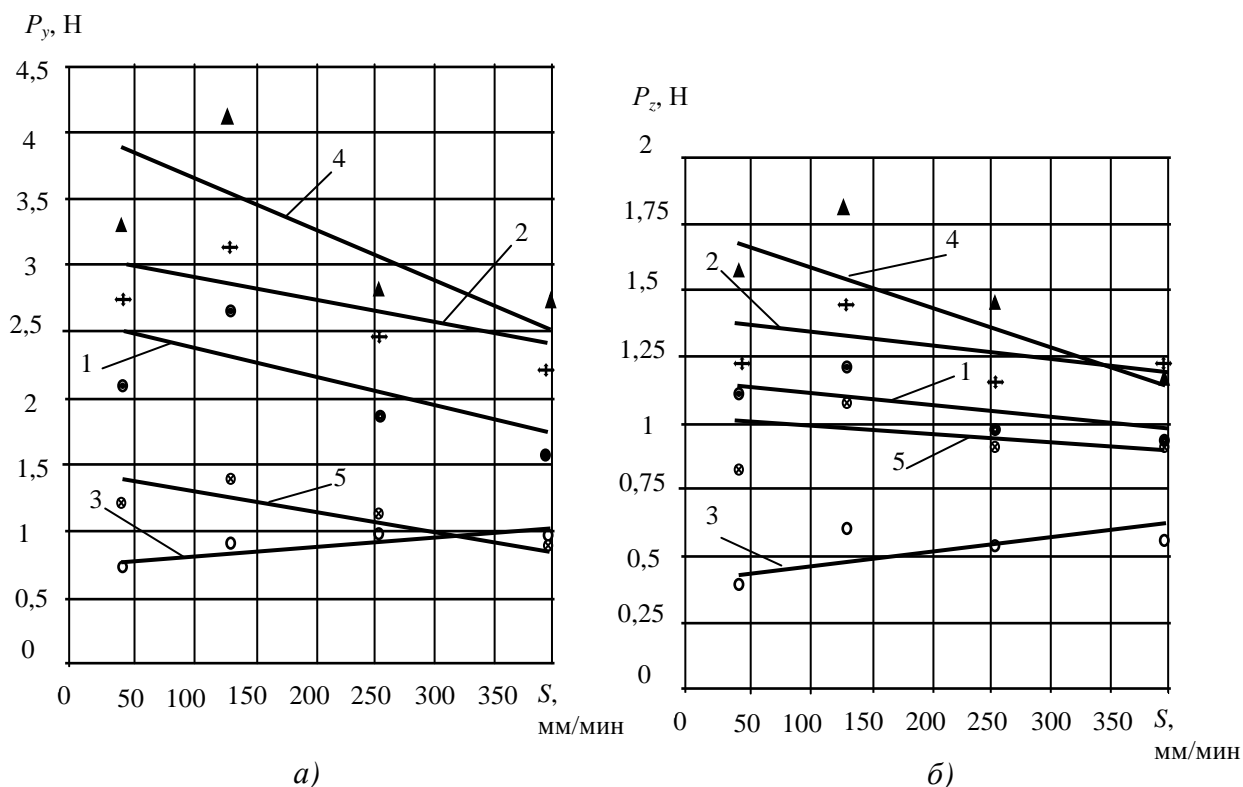
Исследования показали (см. п. 3.2), что эластичные полимерно-абразивные круги не являются идеально упругими. Они обладают вязко-упругими свойствами, в результате чего за период одного оборота, когда наступает следующий контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью, не успевает произойти восстановление заданной деформации. Поэтому для кругов, обладающих меньшими вязкостными свойствами, силы растут, а для кругов с большей вязкостью – уменьшаются.



- 1 —●— FS-WL 8A MED; 2 —+— FS-WL 6S FIN; 3 —○— FS-WL 2S CRS;  
 4 —▲— DB-WL 8S MED при радиальной деформации  $\Delta Y = 1,5$  мм;  
 5 —⊗— CF-FB 0,5A FIN при радиальной деформации  $\Delta Y = 4,0$  мм.

**Рисунок 3.16 – Зависимость нормальной  $P_y$  (а) и тангенциальной  $P_z$  (б) составляющей силы резания в расчете на 1 мм ширины обработки от скорости резания  $V$  для кругов при  $S = 130$  мм/мин**

На рисунке 3.17 представлены зависимости нормальной (а) и тангенциальной (б) составляющей силы резания от продольной подачи, из которых видно, что с ростом продольной подачи значения составляющих силы резания увеличиваются для более жестких кругов и уменьшаются для менее жестких. Это объясняется различием вязко-упругих свойств эластичных кругов и слишком малой толщиной снимаемого слоя материала.



- 1 —●— FS-WL 8A MED при  $V = 441,4$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм;
- 2 —+— FS-WL 6S FIN при  $V = 406,8$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм;
- 3 —○— FS-WL 2S CRS при  $V = 462,4$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм;
- 4 —▲— DB-WL 8S MED при  $V = 464,3$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм;
- 5 —⊗— CF-FB 0,5A FIN при  $V = 606,3$  м/мин,  $\Delta Y = 4,5$  мм

**Рисунок 3.17 – Зависимость нормальной  $P_y$  (а) и тангенциальной  $P_z$  (б) составляющей силы резания в расчете на 1 мм ширины обработки от продольной подачи  $S$  для кругов**

Следует отметить, что на рисунках 3.15–3.17 линиями показаны зависимости, полученные путем расчета по предложенной теоретической математической модели, а точками – экспериментальные данные.

Результаты расчета упругой и центробежной составляющей силы, а также нормальной составляющей силы резания и сопоставление их со статистически обработанными экспериментальными данными приведены в таблицах А.2–А.6 приложения А. Из приведенных в этих таблицах результатов видно, что разработанная для определения нормальной составляющей силы резания теоретическая математическая модель хорошо коррелирует с экспериментальными данными и может быть рекомендована для использования в инженерных расчетах.

Доверительные границы отклонений экспериментальных данных от теоретически полученных определяются по методике, приведенной в п. 2.5 и составляют:  $\pm 0,047$  Н для силы  $P_y$  при доверительной вероятности  $P=0,95$ .

Для того, чтобы полученные результаты исследования сделать удобными для использования в практических целях (упростить процесс выбора эластичного полимерно-абразивного круга и назначения режимов обработки при разработке технологических процессов изготовления дета-

лей), проведена аппроксимация полученных теоретически рассчитанных данных (для исследуемых в настоящей работе кругов) в виде уравнений, представляющих собой полином второй степени. Аппроксимация проведена согласно методике, изложенной в п. 2.5. Данные уравнения (А.1–А.2) приведены в п. А.2 приложения А. В производственных условиях, разработанная теоретическая математическая модель может быть использована при наличии соответствующего программного обеспечения, при его отсутствии рекомендовано использование упрощенных зависимостей (А.1–А.2).

Таким образом, в результате проведенных исследований, установлены закономерности изменения нормальной  $P_y$  и тангенциальной  $P_z$  составляющих силы резания от режимных параметров обработки: деформации круга  $\Delta Y$ , скорости резания  $V$  и подачи  $S$ , что дает возможность управлять силами в зависимости от условий производства.

Знание сил резания необходимо при определении мощности привода в процессе проектирования новых и выборе существующих устройств для финишной обработки деталей.

Разработанную математическую модель сил взаимодействия, которая является подсистемой третьего уровня, следует считать устойчивой в связи с тем, что воздействие возмущающих факторов (входных параметров) корректируется системой управления, рассмотренной в п. 2.1.2.

### 3.3 Производительность процесса зачистки поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами

#### 3.3.1 Разработка теоретических положений для определения съема материала при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами

Основной характеристикой производительности процесса обработки является съём материала. Съём при исследуемом способе обработки происходит в процессе взаимодействия абразивных зерен эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью и включает в себя объем материала, вытесненного в виде стружки и материала, разрушенного при многократном пластическом и упругом деформировании (полидеформировании), которое происходит в результате накладывающихся многочисленных воздействий абразивных зерен.

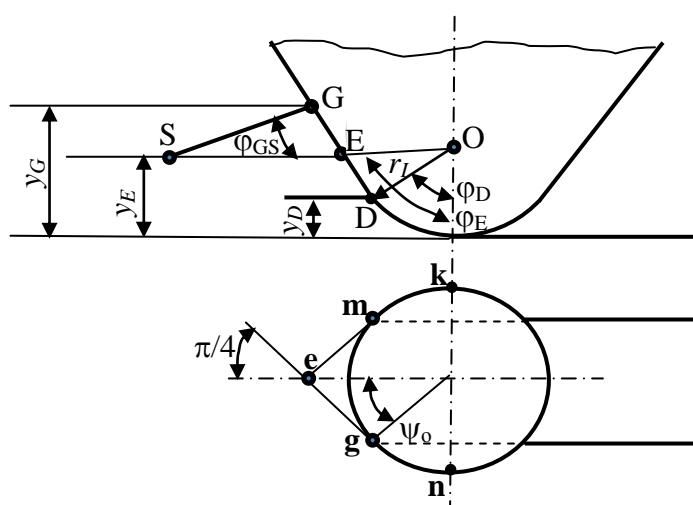


Рисунок 3.18 – Взаимодействие модели единичного зерна с обрабатываемой поверхностью

абразивных зерен эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью и включает в себя объем материала, вытесненного в виде стружки и материала, разрушенного при многократном пластическом и упругом деформировании (полидеформировании), которое происходит в результате накладывающихся многочисленных воздействий абразивных зерен.

Как показали расчеты [57], объем упруго и пластически деформированного

материала представляет собой незначительную величину по сравнению с объемами стружки.

Поэтому формулу съёма материала с единицы площади можно записать следующим образом:  $Q = B \cdot l \cdot Q_c \cdot T \cdot n$ ,

где  $B$  – ширина обработки, мм;  $n$  – частота вращения круга, об/мин;  $T$  – время обработки, мин;  $l$  – длина обрабатываемой поверхности, мм;  $Q_c$  – объем материала, срезанного эластичным полимерно-абразивным кругом за один оборот на единице ширины (1 мм) при перемещении в контакте с обрабатываемой поверхностью на длину 1 мм.:  $Q_c = S_c \cdot N \cdot 2\pi \cdot R_k \cdot L_k$ .

Имеет смысл перейти на относительные величины, например, на удельный съём при перемещении периферии круга относительно детали на 1 мм:  $Q_{c1} = S_c \cdot N \cdot L_k$ ,

где  $S_c$  – площадь поперечного сечения стружки на единичном зерне [57];  $N$  – количество зерен контакта на площади 1 мм<sup>2</sup>;  $L_k$  – длина участка контакта при заданной деформации круга  $\Delta Y$ :

$$\text{для плоской обрабатываемой поверхности: } L_k = 2\sqrt{\Delta Y \cdot R_k - \Delta Y^2}, \quad (3.34)$$

$$\text{для наружной цилиндрической поверхности: } L_k = \beta \cdot R_D, \quad (3.35)$$

где  $\beta$  – угол контакта детали с кругом в радианах определен из условия, что  $\Delta Y = \Delta Y_K + \Delta Y_D$ , так как  $\Delta Y_K \cdot R_k = \Delta Y_D \cdot R_D$ , а  $\Delta Y_D = R_D \cdot (1 - \cos\beta/2)$ .

$$\text{После преобразования получим: } \cos \frac{\beta}{2} = 1 - \Delta Y \cdot \frac{R_k}{(R_D + R_k) \cdot R_D},$$

где  $R_k$  – радиус эластичного полимерно-абразивного круга, мм;  $R_D$  – радиус детали, мм;

$$\text{для внутренней цилиндрической поверхности: } L_k = \beta \cdot R_D, \quad (3.36)$$

$$\text{где } \cos \frac{\beta}{2} = 1 - \Delta Y \cdot \frac{R_k}{(R_D - R_k) \cdot R_D}.$$

Удельный съём  $q$  в мкм/(м·мин) на 1 мм ширины обработки представляет собой слой материала, срезанный с детали при перемещении поверхности круга в контакте с деталью на длине 1 мм. Этот показатель характеризует толщину снятого слоя в любой точке обработанной поверхности. По нему можно судить об изменении размера детали в процессе обработки или изменении высоты исходной шероховатости.

$$q = \frac{Q_{c1} \cdot S \cdot T_0 \cdot 10^6}{L} = \frac{S_c \cdot N \cdot L_k \cdot S \cdot 10^6}{(2\pi \cdot R_k \cdot n - S)}. \quad (3.37)$$

Здесь  $L$  – путь перемещения поверхности круга относительно детали в м:

$$L = \frac{(\pi \cdot D \cdot n - S) \cdot T_0}{1000},$$

где  $T_0$  – время обработки длины  $l$ , мин:  $T_0 = \frac{l}{S}$ ;  $R_k$  – радиус круга, мм;  $n$  – частота вращения круга, об/мин;  $S$  – продольная подача, мм/мин.

По аналогии с [57], целесообразно в качестве модели единичного зерна принять конус со скруглённой вершиной. При внедрении зерна под углом к поверхности впереди его образуется валик наплыва (рисунок 3.18), который при определённых условиях может переходить в стружку. Пластически отеснённый материал, обтекая зерно без отделения от основной массы, обра-

зует наплыв по его боковым сторонам [57, 58].

На рисунке 3.18 приняты обозначения:  $y_E$  – глубина внедрения зерна;  $mg$  – участок, на котором происходит стружкообразование;  $D$  – точка перехода сферической части в коническую;  $mk$  и  $gn$  – участки, на которых при движении зерна материал пластически оттесняется в наплыв.

Площадь поперечного сечения стружки на единичном зерне по данным работы [57]:

$$S_C = 2r_{\Sigma}^2 \cdot \sin \psi_0 \cdot (A_E - A_O), \text{ при } y_E \leq y_D; \quad (3.38)$$

$$S_C = 2r_{\Sigma}^2 \cdot \sin \psi_0 \cdot [A_D + A_O + \Delta \varepsilon \cdot (0,5 \cdot \Delta \varepsilon \cdot \operatorname{ctg} \varphi_D + \sin \varphi_D)] \text{ при } y_E > y_D, \quad (3.39)$$

где  $r_{\Sigma}$  – эквивалентный радиус закругления абразивного зерна и микронеровности обрабатываемой поверхности (3.20);  $\psi_0$  – угол заторможенного участка на сферическом абразивном зерне.

$$\psi_0 = \pi/4 - 0,5 \cdot \arccos 2\mu_T \text{ (при } \mu_T = 0,4 \text{ } \psi_0 = 0,46365 \text{ рад).}$$

(Здесь  $A_E = 0,5 \cdot \varphi_E - 0,25 \cdot \sin 2\varphi_E$ ;  $\varphi_E = \arccos(1 - \varepsilon_E)$ ;  $\varepsilon_E = y_E/r_{\Sigma}$ ;  $A_O = 0,5 \cdot \varphi_O - 0,25 \cdot \sin 2\varphi_O$ ;

$\varphi_O = 0,5 \cdot \arccos 2\mu_T$  (углы  $\varphi_E$  и  $\varphi_O$  в радианах);  $A_D = 0,5 \varphi_D - 0,25 \sin 2\varphi_D$ ;  $\Delta \varepsilon = \varepsilon_E - \varepsilon_D$ ;  $\varepsilon_D = y_D/r_I$ ;  $y_D = r_I(1 - \sin \varphi_D)$ . При  $\varphi_D = 45^\circ = 0,7854$  рад.  $y_D = 0,293 \cdot r_I$ .

Здесь  $r_I$  – средний радиус кривизны вершин выступов режущего микрорельефа эластичного полимерно-абразивного круга (3.18);  $y_E$  – математическое ожидание глубины внедрения пластически деформирующих материал выступов зерен (3.7) (см. п. 3.1.4).

Для определения  $y_E$  необходимо воспользоваться зависимостями составляющих сил резания для единичного зерна.

Нормальная  $P_y^1$  и тангенциальная  $P_z^1$  составляющие силы резания на единичном зерне определяются по (3.31).

Микрорельеф режущей поверхности исследуемых инструментов рассмотрен в п. 3.1.3. Необходимо учитывать, что в уравнении (3.18) приведено среднее значение радиуса кривизны вершин на всем режущем микрорельефе инструмента.

В работах [21, 57, 115, 128, 204, 254] авторами установлено, что кривизна вершин выступов (радиус  $r_I$ ) зависит от уровня сближения  $\gamma$  (см. рис. 3.5) режущего микрорельефа с обрабатываемой поверхностью. Таким образом, следует сделать вывод о том, что радиус  $r_I$  зависит и от математического ожидания глубины внедрения выступов абразивных зерен  $y_E$ , которая, в свою очередь, зависит от нормальной составляющей силы резания  $P_y$  и, соответственно, от режимных параметров обработки  $\Delta Y$ ,  $V$  и  $S$ .

Нельзя не принять во внимание тот факт, что при малой глубине внедрения режущего микрорельефа при обработке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами, учесть все факторы постоянно меняющейся микрогеометрии в результате износа инструмента и самозаточивания практически невозможно.

В связи с вышеизложенным, принято решение определять реальный радиус  $r_l$  экспериментально в зависимости от уровня сближения  $\gamma$ , а, следовательно, от режимных параметров обработки –  $\Delta Y$ ,  $V$  и  $S$ .

Полученная экспериментально зависимость радиуса кривизны вершин зерен от режимных параметров обработки ( $V$ ,  $\Delta Y$  и  $S$ ) имеет вид:

$$r_l = g_1 \cdot \Delta Y^2 + g_2 \cdot V^2 + g_3 \cdot S^2 + g_4 \cdot \Delta Y + g_5 \cdot V + g_6 \cdot S + g_7 \cdot \Delta Y \cdot V + g_8 \cdot \Delta Y \cdot S + g_9 \cdot V \cdot S + g_{10} \cdot \Delta Y \cdot V \cdot S + g_{11}. \quad (3.40)$$

Значения коэффициентов  $g_1$ – $g_{10}$  и свободного члена  $g_{11}$  для формулы (3.40) приведены в таблице 3.11. Скорости резания  $V$  в м/с, деформации круга  $\Delta Y$  в мм и подачи  $S$  в м/мин.

**Таблица 3.11 – Значения коэффициентов и свободного члена в формуле (3.40)**

Коэффициент	FS-WL 8A MED	FS-WL 6S FIN	FS-WL 2S CRS	DB-WL 8S MED	CF-FB 0,5A FIN
$g_1$	$6 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$
$g_2$	0	$5,556 \cdot 10^{-9}$	$1,389 \cdot 10^{-9}$	0	0
$g_3$	$-1,4 \cdot 10^{-8}$	$-1 \cdot 10^{-9}$	0	$-1 \cdot 10^{-8}$	$-2,5 \cdot 10^{-9}$
$g_4$	$4 \cdot 10^{-3}$	-0,0145	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-5}$
$g_5$	0	$8,333 \cdot 10^{-7}$	$8,333 \cdot 10^{-7}$	$3,333 \cdot 10^{-7}$	$1,667 \cdot 10^{-8}$
$g_6$	$-1,5 \cdot 10^{-6}$	$-5 \cdot 10^{-8}$	0	$-1 \cdot 10^{-6}$	$-5 \cdot 10^{-8}$
$g_7$	0	$1,167 \cdot 10^{-9}$	$1,167 \cdot 10^{-9}$	0	0
$g_8$	$5 \cdot 10^{-7}$	$-5 \cdot 10^{-6}$	0	$5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
$g_9$	0	$6,667 \cdot 10^{-9}$	0	0	0
$g_{10}$	0	$1,667 \cdot 10^{-11}$	0	0	0
$g_{11}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,015	$2 \cdot 10^{-4}$	$-1,3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-5}$

Суммарные составляющие силы резания на всей площадке контакта (согласно [57]):

$$P_y = K \cdot r_s^2 \cdot f_y \cdot n_p; \quad P_z = K \cdot r_s^2 \cdot f_z \cdot n_p, \quad (3.41)$$

Средневероятное количество активных (работающих) зерен на единице поверхности контакта эластичного полимерно-абразивного круга с деталью определяется (согласно [128]) по выражению:

$$n_p = N \cdot B \cdot L_k, \quad (3.42)$$

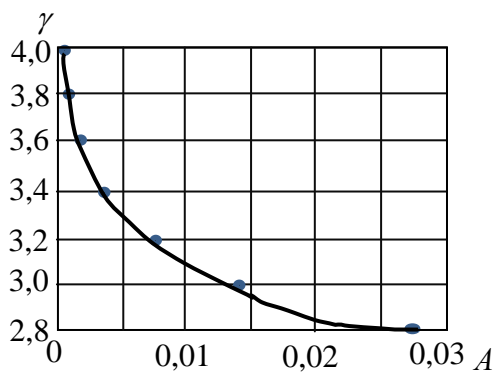
Подставляя (3.7), (3.15), (3.20), (3.32) и (3.42) в уравнение (3.41) и решая относительно  $\gamma$ , получаем выражение:

$$\left(\gamma^{0,802} - \gamma + 0,97\right)^{0,895} \cdot \gamma \cdot e^{-\left(\frac{\gamma^2}{2}\right)} = \frac{P_y}{9,0149 \cdot K \cdot r_s^2 \cdot \left(\frac{\sigma}{r_s}\right)^{0,895} \cdot n^2(0) \cdot B \cdot L_k}, \quad (3.43)$$

где  $P_y$  – полная нормальная составляющая силы для  $B = 1$  мм (см. таблицы А.2–А.6 приложения А).

Определение величины  $\gamma$  по формуле (3.43) возможно только при решении численным методом. На рисунке 3.19 приведена зависимость  $\gamma$  от  $A$  – правой части уравнения (3.43).

Эта зависимость была аппроксимирована уравнением:  $\gamma = 2,5A^{-0,0531} \cdot e^{-2,929 \cdot A}$ .



**Рисунок 3.19 – Графическое представление уравнения (3.43)**

пластической деформации и разрушения.

Следует отметить, что металл, соприкасаясь с окружающей средой, адсорбирует атомы и молекулы данной среды и на его поверхности образуется сложная система адсорбционных слоёв. А.С. Ахматов [14] приводит следующую схему их расположения, начиная от первичной объёмной структуры металла: зона деформированного металла, слой окислов металла, адсорбционный слой газов, адсорбционный слой воды, адсорбционный слой полярных молекул органического вещества (смазочного материала).

Не учитывать данную особенность приповерхностного слоя и ее влияние на взаимодействие зерна с обрабатываемой поверхностью нельзя.

Зачистка поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами – это удаление тонкого поверхностного слоя с вершин микронеровностей обрабатываемой поверхности до уровня требуемой шероховатости. Поэтому использованные результаты исследования работы [57] по склерометрии полированной поверхности (3.41) количественно, по пределу текучести на сдвиг  $K$ , не могут быть приняты в чистом виде.

Таким образом, необходимо принять гипотезу о том, что царапание полированной поверхности и резание эластичным полимерно-абразивным кругом вершин неровностей, предразрушенных во время предыдущей механической обработки и контактирующих с окружающей средой, не одно и то же. Принимаем  $K = K_{п} \cdot K_{ск}$ , где  $K_{ск}$  – предел текучести на сдвиг, полученный склерометрированием в работе [57];  $K_{п}$  – коэффициент, учитывающий глубину внедрения абразивных зерен эластичного полимерно-абразивного круга в обрабатываемый материал.

Поскольку глубина внедрения зерен зависит от скорости резания  $V$ , деформации  $\Delta Y$  эластичного полимерно-абразивного инструмента и подачи  $S$ , то поправочный коэффициент определяет экспериментально установленное выражение:

$$K_{п} = (d_1 \cdot V^2 + d_2 \cdot V + d_3)(d_4 \cdot \Delta Y^2 + d_5 \cdot \Delta Y + d_6)(d_7 \cdot S^3 + d_8 \cdot S^2 + d_9 \cdot S + d_{10}). \quad (3.44)$$

В уравнении (3.44) значения коэффициентов и свободных членов определены по итогам комплекса экспериментов и приведены в таблице 3.12. В уравнении (3.44)  $\Delta Y$  в мм,  $V$  в м/мин,  $S$  в мм/мин.



Таблица 3.12 – Значения коэффициентов и свободных членов в (3.44)

Коэффици- циент	FS-WL 8A MED	FS-WL 6S FIN	FS-WL 2S CRS	DB-WL 8S MED	CF-FB 0,5A FIN
$d_1$	$5,65 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$1,538 \cdot 10^{-5}$	$4,906 \cdot 10^{-6}$	$2,65 \cdot 10^{-5}$
$d_2$	$-7,213 \cdot 10^{-3}$	-0,098	-0,025	$-6,967 \cdot 10^{-3}$	-0,041
$d_3$	3,565	47	12,594	3,539	30,4
$d_4$	-0,126	-0,33	1,005	0,758	0,014
$d_5$	0,467	1,097	-6,433	-2,661	-0,287
$d_6$	0,583	0,097	10,8	3,286	1,924
$d_7$	$3,62 \cdot 10^{-8}$	$2,516 \cdot 10^{-8}$	$1,228 \cdot 10^{-9}$	$-3,83 \cdot 10^{-10}$	$-1,022 \cdot 10^{-7}$
$d_8$	$-1,787 \cdot 10^{-5}$	$-1,979 \cdot 10^{-5}$	$-5,67 \cdot 10^{-6}$	$5,34 \cdot 10^{-6}$	$8,624 \cdot 10^{-5}$
$d_9$	$2,12 \cdot 10^{-3}$	$7,014 \cdot 10^{-3}$	$8,161 \cdot 10^{-3}$	$-1,148 \cdot 10^{-3}$	-0,0219
$d_{10}$	0,947	0,367	0,0373	1,06	2,57

### 3.3.2 Расчет съёма материала по разработанной теоретической математической модели

Для подтверждения адекватности предложенной математической модели, проведены расчет съёма материала по формуле (3.37) и экспериментальные исследования в зависимости от деформации круга, скорости резания и продольной подачи.

Для реализации разработанной математической модели расчета съёма материала разработана программа с использованием приложения Borland C++ Builder 6.0, блок-схема которой представлена на рисунке 3.20. Исходный код программы приведен в п. А.3.3 приложения А, а диалоговое окно – на рисунке А.3 приложения А. Данная программа отражает теоретические положения, разработанные для случая контакта эластичного полимерно-абразивного круга с плоской обрабатываемой поверхностью, поскольку экспериментальные исследования были проведены при данных условиях.

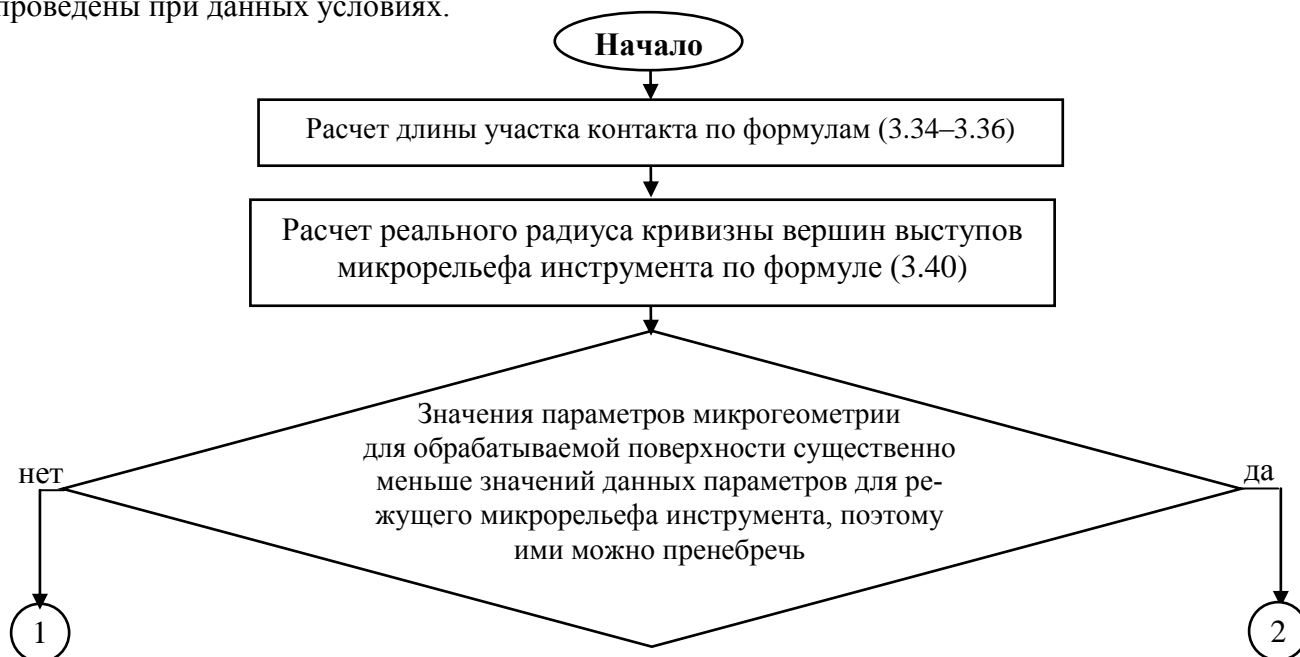


Рисунок 3.20 – Блок-схема программы, предназначенной для реализации математической модели расчета съёма материала при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами

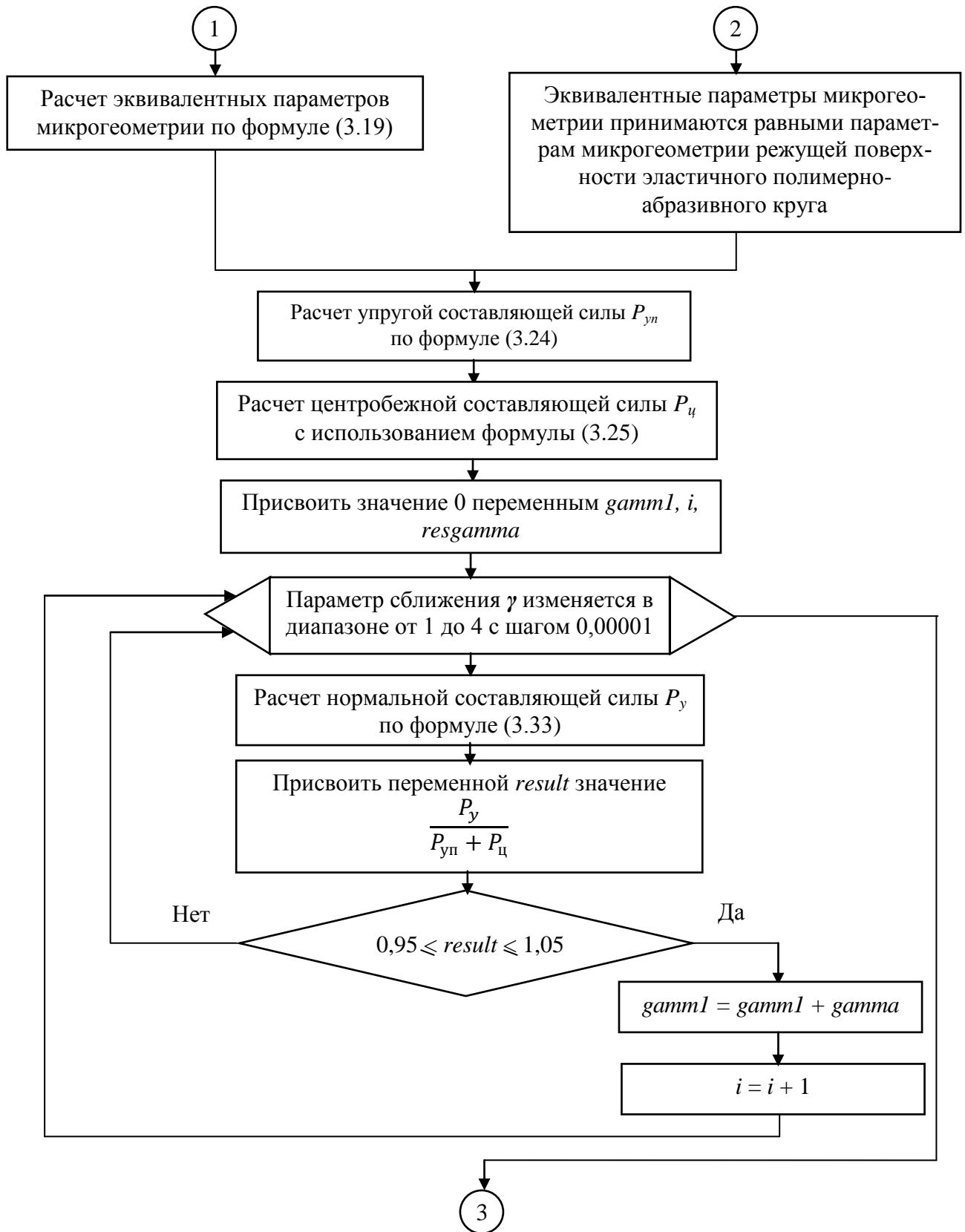


Рисунок 3.20 – Продолжение



Рисунок 3.20 – Окончание

Следует отметить, что разработанная и описанная в п. 3.3.1 математическая модель может быть использована для расчета съема материала при обработке эластичными полимерно-абразивными инструментами как хорошо доступных, открытых плоских, наружных и внутренних цилиндрических поверхностей, так и при обработке оребренных деталей с труднодоступными участками при использовании, в том числе, инструментов малого диаметра.

### 3.3.3 Экспериментальные исследования съема материала

Экспериментальные исследования были проведены на универсально-фрезерном станке, приведенном на рисунке 2.17. Обработка производилась на следующих режимах:

- частота вращения круга  $n = 500, 1000, 1250, 1600$  об/мин,
- подача (попутная)  $S = 42, 130, 255, 395$  мм/мин,
- радиальная деформация круга  $\Delta Y = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5$  мм.

На указанных режимах были проведены эксперименты по обработке образцов из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2 (см. рисунок 2.13) .

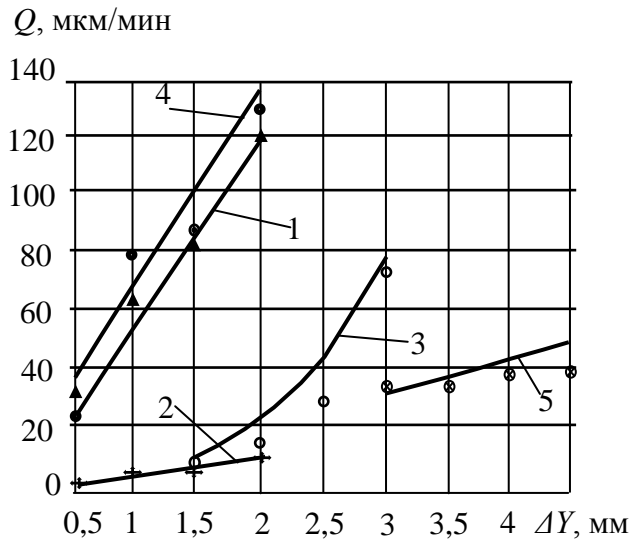
В качестве показателя производительности процесса использован относительный съем  $Q$  (в мкм/мин), который определялся по формуле:  $Q = \frac{g_1 - g_2}{\gamma_{al} \cdot B \cdot l \cdot T}$ ,

где  $\gamma_{al} = 2,85 \cdot 10^{-3}$  г/мм<sup>3</sup> – плотность для материала В95пчТ2;  $T$  – время обработки, в мин  $T = \frac{l}{S}$ ;  $g_1$  и  $g_2$  – масса образца до и после обработки соответственно, г.

Измерение масс производилось на электронных весах, показанных на рисунке 2.21, с точностью 0,1 мг.

На рисунке 3.21 приведены зависимости относительного съема  $Q$  от деформации круга.

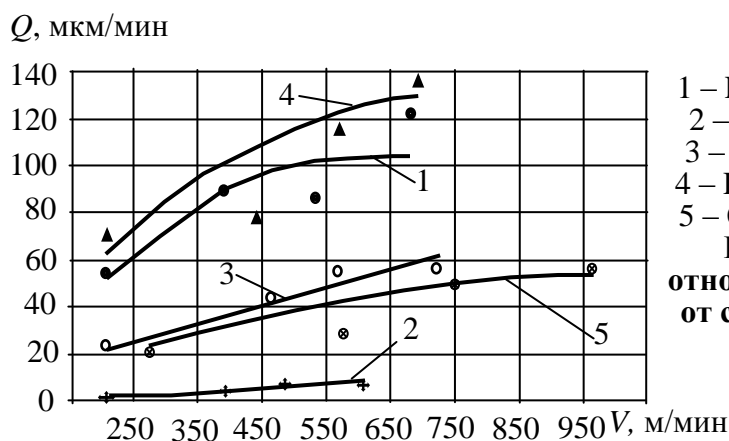
На рисунках 3.21, 3.22 и 3.23 точками обозначены экспериментальные данные, а линиями – расчетные по математической модели.



- 1 – FS-WL 8A MED при  $V = 441,4$  м/мин;
- 2 – FS-WL 6S FIN при  $V = 406,8$  м/мин;
- 3 – FS-WL 2S CRS при  $V = 462,4$  м/мин;
- 4 – DB-WL 8S MED при  $V = 464,3$  м/мин;
- 5 – CF-FB 0,5A FIN при  $V = 606,3$  м/мин

**Рисунок 3.21 – Зависимость относительного съема материала  $Q$  от деформации  $\Delta Y$  при  $S = 130$  мм/мин для кругов**

CRS – более 3 мм и для круга CF-FB 0,5A FIN – более 4,5 приводит к интенсивному износу инструмента.



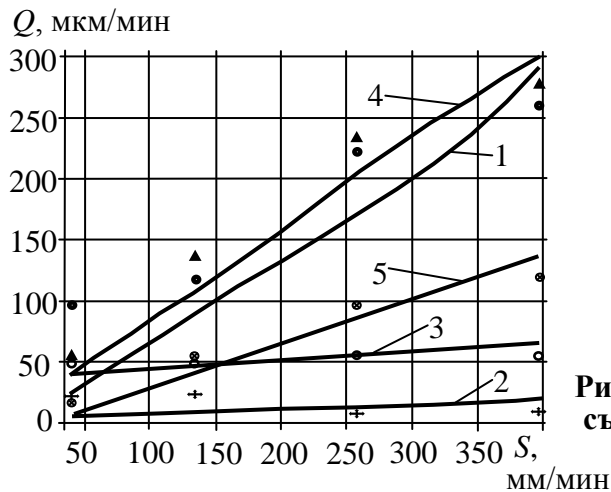
- 1 – FS-WL 8A MED при  $\Delta Y = 1,5$  мм;
- 2 – FS-WL 6S FIN при  $\Delta Y = 1,5$  мм;
- 3 – FS-WL 2S CRS при  $\Delta Y = 2,5$  мм;
- 4 – DB-WL 8S MED при  $\Delta Y = 1,5$  мм;
- 5 – CF-FB 0,5A FIN при  $\Delta Y = 4,5$  мм.

**Рисунок 3.22 – Зависимость относительного съема материала  $Q$  от скорости  $V$  при  $S = 130$  мм/мин для кругов**

На рисунке 3.22 приведены зависимости относительного съема от скорости резания. Установлено, что относительный съем материала с увеличением скорости растет. Это объясняется тем, что с увеличением скорости растет динамическая составляющая силы удара абразивного зерна по обрабатываемой поверхности.

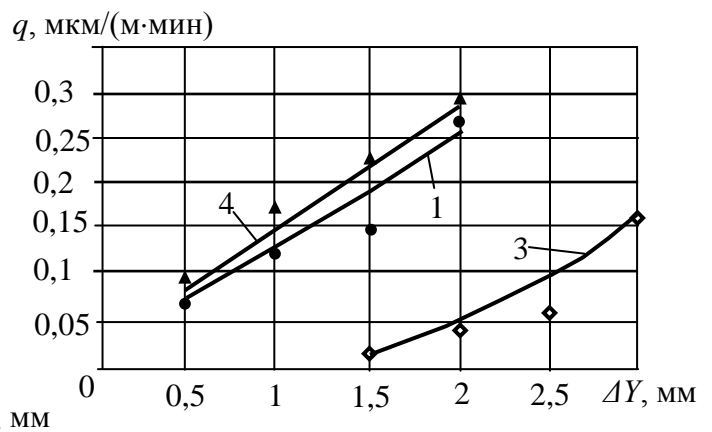
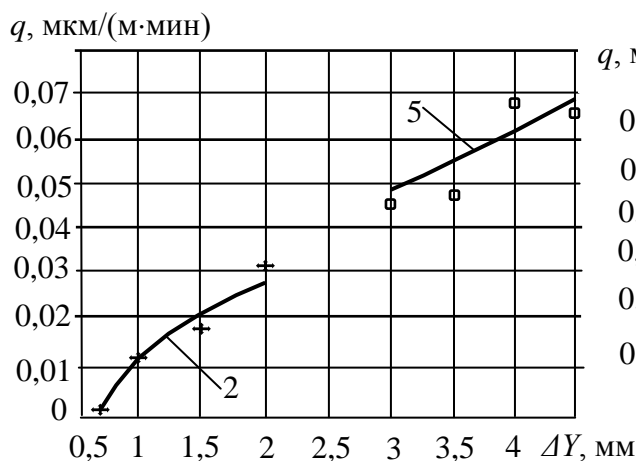
При этом установлено, что при увеличении скорости свыше 750–1000 м/мин связующий нетканый материал начинает размягчаться и процесс резания ухудшается.

Повышение интенсивности съема материала с увеличением подачи (рисунок 3.23) объясняется тем, что при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами при большей подаче материал с вершин микронеровностей снимается интенсивнее (по объему), чем с плоскости. Эластичный материал связки инструмента облегает вершину со всех сторон и, соответственно, интенсивнее ее срезает. При большой подаче резание происходит по вершинам неровностей, а при малой подаче – площадки неровностей по мере углубления увеличиваются и резание происходит, в большей степени, по плоскости.



- 1 – FS-WL 8A MED при  $V = 441,4$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм;
- 2 – FS-WL 6S FIN при  $V = 406,8$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм;
- 3 – FS-WL 2S CRS при  $V = 462,4$  м/мин,  $\Delta Y = 2,5$  мм;
- 4 – DB-WL 8S MED при  $V = 464,3$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм;
- 5 – CF-FB 0,5A FIN при  $V = 606,3$  м/мин,  $\Delta Y = 4,5$  мм.

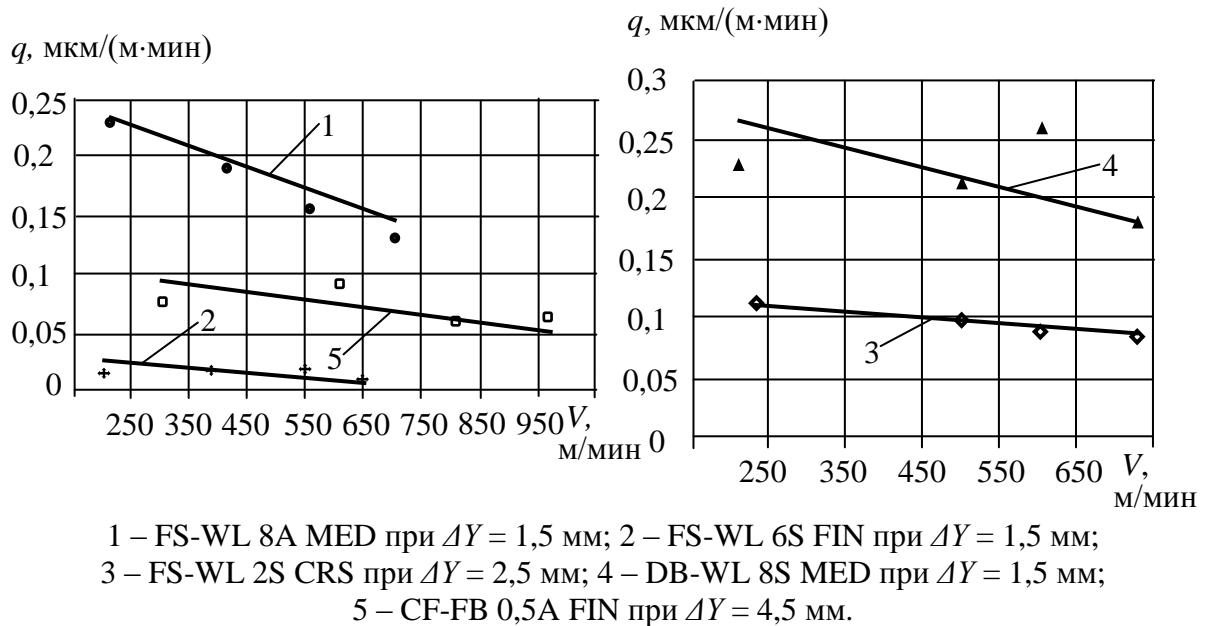
Рисунок 3.23 – Зависимость относительного съема материала  $Q$  от подачи  $S$  для кругов



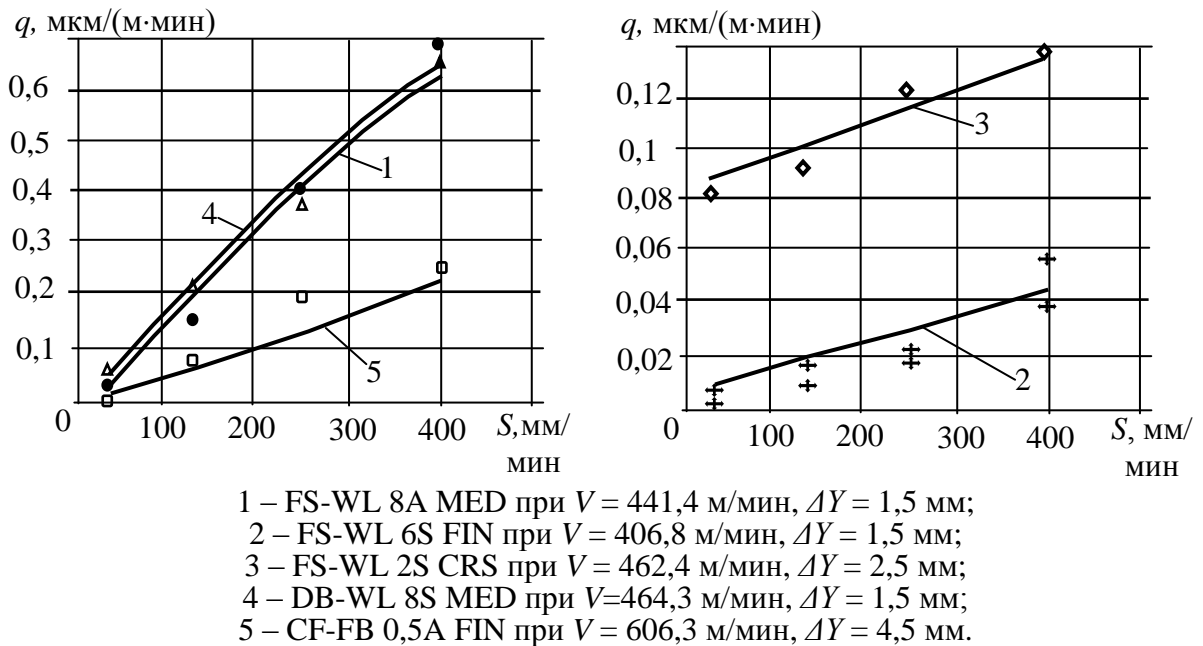
- 1 – FS-WL 8A MED при  $V = 441,4$  м/мин; 2 – FS-WL 6S FIN при  $V = 406,8$  м/мин;
- 3 – FS-WL 2S CRS при  $V = 462,4$  м/мин; 4 – DB-WL 8S MED при  $V = 464,3$  м/мин;
- 5 – CF-FB 0,5A FIN при  $V = 606,3$  м/мин.

Рисунок 3.24 – Зависимость удельного съема материала  $q$  от деформации  $\Delta Y$  при  $S = 130$  мм/мин для кругов

На рисунках 3.24–3.26 приведены зависимости удельного съема  $q$  в мкм/(м·мин) на 1 мм ширины обработки, который представляет собой слой материала, срезанный с детали при перемещении поверхности круга в контакте с деталью на длине 1 мм.



**Рисунок 3.25 – Зависимость удельного съема материала  $q$  от скорости резания  $V$  при подаче  $S = 130$  мм/мин для кругов**



**Рисунок 3.26 – Зависимость удельного съема материала  $q$  от продольной подачи  $S$  для кругов**

Линиями показаны зависимости, рассчитанные по формуле (3.37) с использованием разработанных теоретических положений. Точками показаны результаты экспериментальных исследований.

Характер изменения удельного съема материала  $q$  от параметров обработки хорошо коррелирует с зависимостями относительного съема  $Q$ , приведенными на рисунках 3.21–3.23.

Установлено, что с увеличением скорости резания, деформации и продольной подачи удельный съём материала возрастает.

Результаты расчета съема материала по разработанной теоретической математической модели (относительный съём  $Q_T$  и удельный съём  $q_T$ ), а также статистически обработанные экспериментальные данные ( $q_0$ ), полученные при обработке плоскостей исследованными эластичными полимерно-абразивными кругами приведены в таблицах А.7-А.11 (п. А.3.1 приложения А).

Следует отметить хорошее совпадение экспериментальных и теоретических данных.

Доверительные границы отклонений экспериментальных данных от теоретически полученных по удельному съему  $q$  определяются по методике, приведенной в п. 2.5 и составляют:  $\pm 0,002$  мкм/м·мин при доверительной вероятности  $P=0,95$ .

В производственных условиях, разработанная теоретическая модель может быть использована при наличии соответствующего программного обеспечения, при его отсутствии рекомендовано использование упрощенных зависимостей, полученных путем аппроксимации данных, рассчитанных теоретически. Данные зависимости (А.4) справедливы для исследованных в настоящей работе эластичных полимерно-абразивных кругов при обработке высокопрочного алюминиевого сплава В95ПчТ2 и приведены в п. А.3.2 приложения А.

Разработанную математическую модель съема материала (производительности процесса обработки эластичными полимерно-абразивными кругами), которая является подсистемой четвертого уровня, следует считать устойчивой в связи с тем, что воздействие возмущающих факторов (входных параметров) корректируется системой управления, рассмотренной в п. 2.1.2 и п. 7.1.

### **3.4 Шероховатость обработанной поверхности**

Для обоснованного выбора эластичных полимерно-абразивных инструментов и параметров обработки, необходимы знания об их влиянии на процесс формирования шероховатости обрабатываемой поверхности.

Достижимая шероховатость формируется в процессе обработки независимо от исходного состояния обрабатываемой поверхности. Ее параметры зависят от условий, режимов обработки, а также свойств обрабатываемого материала. Если шероховатость поверхности до обработки была меньше достижимой, то в процессе обработки она увеличивается; если больше, то уменьшается до значения достижимой [15, 57, 58].

#### ***Теоретические основы формирования шероховатости обработанной поверхности***

Ранее было установлено (см. п. 3.1.3), что режущий микрорельеф абразивного инструмента (согласно [57, 203]) может быть описан в виде случайного стационарного процесса с нормальным законом распределения. Профилограмма в этом случае будет являться реализацией данного случайного процесса [57, 58, 84, 262, 285]. Параметрами, которые необходимы для

расчета взаимодействия режущего микрорельефа с обрабатываемой поверхностью, являются: среднее квадратичное отклонение профиля  $\sigma$ ; число максимумов  $m$  и число нулей (пересечений со средней линией)  $n(0)$ .

Для эластичных полимерно-абразивных кругов, использованных в настоящей работе, данные параметры установлены и представлены в таблице 3.6.

При взаимодействии режущего микрорельефа в сечении круга, имеющего среднюю линию в зоне контакта с деталью  $m_1m_1$  (рисунок 3.5, а), с идеально гладкой обрабатываемой поверхностью (линия  $m_2m_2$ ), абразивные зерна внедряются в обрабатываемый материал и формируют достижимую шероховатость.

Значение сближения и расстояние любой точки поверхности  $m_2m_2$  до средней линии микрорельефа  $m_1m_1$  удобнее выражать в относительных величинах  $\gamma = y_E/\sigma$ .

При разработке теоретических обоснований формирования микрорельефа обрабатываемой поверхности при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами, в основу данного процесса положено взаимодействие единичного зерна с обрабатываемой поверхностью. В качестве модели единичного зерна принят конус с закруглённой по радиусу вершиной, аналогично работе [57], посвященной другим видам абразивной обработки.

Согласно рисунку 3.18:  $r_I$  – радиус закругления зерна;  $y_E$  – глубина внедрения зерна;  $y_D$  – глубина внедрения до точки перехода сферической части в коническую;  $y_G$  – глубина внедрения с учетом наплыва;  $\varphi_{GS}$  – угол наплыва;  $mg$  – участок, на котором происходит стружкообразование;  $D$  – точка перехода сферической части в коническую;  $mk$  и  $gn$  – участки, на которых при движении зерна материал пластически оттесняется в наплыв.  $W_{YA}$  – упругое восстановление материала;  $\gamma^\rho$  – угол конуса.

Высота неровностей по 10-ти точкам  $Rz$  представляет собой среднюю глубину внедрения зерен с учётом наплыва и упругого восстановления царапин.

$$Rz = y_G - W_{YA}.$$

Среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$  зависит от  $Rz$  в следующем соотношении:

$$Ra = 0,25 \cdot Rz \quad \text{при } Rz = 320 - 8 \text{ мкм};$$

$$Ra = 0,20 \cdot Rz \quad \text{при } Rz = 6,3 - 0,05 \text{ мкм}.$$

Данные соотношения получены на основе справочных данных по соотношениям  $Ra$  и  $Rz$ , приведенных в [213] и подтверждаются экспериментальным путем.

Среднее квадратическое отклонение определяется по выражению:

$$\sigma_{II} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot Ra.$$

При внедрения абразивных зерен в *пределах сферической части модели абразивного зерна* с учетом наплыва  $y_G$  (по данным работы [14]), глубина определяется по уравнению:



$$y_G = y_E + r_I \cdot \sqrt{\frac{2[A_E - \sin\psi_0 \cdot (A_E - A_0)]}{\text{ctg}\varphi_{GS} + \text{ctg}\varphi_E}} \quad \text{при } y_E \leq y_D, \quad ,$$

где  $y_E$  – глубина внедрения абразивных зерен.

$$A_E = 0,5\varphi_E - 0,25\sin 2\varphi_E; \quad A_0 = 0,5\varphi_0 - 0,25\sin 2\varphi_0; \quad \varphi_0 = 0,5\text{arc cos} 2\mu_T;$$

$\mu_T$  – коэффициент пластического трения;  $\varphi_E = 0,5\text{arc cos}(1 - y_E/r_I)$ .

Поскольку процесс резания происходит при пластическом деформировании материала, коэффициент пластического трения  $\mu_T$  характеризует трение единичного зерна с пластически деформированным материалом. Согласно работам [57, 235], коэффициент пластического трения может колебаться от 0 до 0,5. Детальные исследования воздействия модели единичного зерна на идеально жесткопластическое полупространство методом линий скольжения приведены в работе [57]. В теоретических расчетах шероховатости обработанной поверхности эластичными полимерными кругами, для обрабатываемого материала В95пчТ2, в соответствии с [57], принято  $\mu_T = 0,4$ .

$$\varphi_{GS} = \frac{\sin\varphi_E}{2\sin\varphi_0} \left( \frac{-\sin\varphi_0 - K^1\sqrt{2} + \sqrt{\sin^2\varphi_0 + 2K^1(\sqrt{2}\sin\varphi_0 + \cos\varphi_E)}}{\cos\varphi_E - K^1} \right) \quad \text{при } y_E \leq y_D,$$

$$\text{где } K^1 = \frac{2}{\varphi_E^2 \cdot \sin\varphi_E} \cdot [A_E - \sin\psi_0 \cdot (A_E - A_0)];$$

$$\varphi_0 = \pi/4 - 0,5\text{arc cos} 2\mu_T.$$

Если внедрение зерна достигает конической части модели абразивного зерна, то  $y_G$

$$\text{определяется по выражению: } y_G = y_E + r_I \cdot \sqrt{\frac{L_Y}{\text{ctg}\varphi_{GS} + \text{tg}\gamma^0}} \quad \text{при } y_E > y_D,$$

$$\text{где } L_Y = 2 \left[ A_D - \sin\psi_0 \cdot (A_D - A_0) + (1 - \sin\psi_0) \cdot \frac{\Delta y_E}{r_I} \cdot \left( \frac{\Delta y_E}{2r_I} \cdot \text{tg}\gamma^0 + \cos\gamma^0 \right) \right];$$

$$\Delta y_E = y_E - y_D = y_E - r_I(1 - \cos\varphi_D); \quad \varphi_D = \pi/2 - \gamma^0;$$

$$\varphi_{GS} = \frac{-\theta - \sqrt{2} \cdot L_Y \cdot \cos\gamma^0 + \sqrt{(\theta + \sqrt{2} \cdot L_Y \cdot \cos\gamma^0)^2 + 2L_Y \cdot \cos^2\gamma^0 \cdot \left( \frac{\theta}{\sin\varphi_0} - L_Y \right)}}{2(\theta - L_Y \cdot \sin\varphi_0)} \quad \text{при } y_E > y_D,$$

$$\text{где } \theta = \sin\varphi_0 \cdot \left( \frac{\Delta y_E}{r_I} + \varphi_D \cdot \cos\gamma^0 \right)^2.$$

Упругое восстановление царапины после снятия нагрузки:

$$W_{YA} = \frac{r_I \cdot K_Y \cdot \sigma_T \cdot (1 - \mu^2)}{\sqrt{3} \cdot E} \cdot f_{YA}, \quad (3.45)$$

$$\text{где } f_{YA} = 2[1 - \sin\gamma^0 + (1 + 3/4 \cdot \pi + \gamma^0 - \varphi_{GS}) \cdot \cos\gamma^0];$$

$\sigma_T$  – предел текучести обрабатываемого материала;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости первого рода обрабатываемого материала;  $K_Y$  – коэффициент, учитывающий отличие

механических свойств тонкого поверхностного слоя по сравнению с основной массой материала с учетом напыла материала и его упругого восстановления.

Для определения глубины внедрения абразивных зерен  $u_E$  по формуле (3.7), целесообразно воспользоваться зависимостями составляющих сил резания для единичного зерна, где нормальная  $P_y^1$  и тангенциальная  $P_z^1$  составляющие силы резания на единичном зерне определяются по выражениям (3.31).

Суммарные составляющие силы резания на всей площадке контакта рассчитываются по (3.41). В результате решения относительно  $\gamma$  получаем выражение (3.43), в котором  $P_y$  – полная нормальная составляющая силы для ширины обрабатываемой поверхности  $B = 1$  мм (см. таблицы А.2 – А.6 приложения А). Определение величины  $\gamma$  проведено численным методом. Зависимость  $\gamma$  от  $A$  (правой части уравнения (3.43)) приведена на рисунке 3.19.

Поскольку при теоретических вычислениях значений достижимой шероховатости было решено пренебречь исходными параметрами микрогеометрии обрабатываемой поверхности, в уравнениях (3.31), (3.41), (3.43) эквивалентный радиус закругления вершин микронеровностей  $r_3$  следует принять равным значению радиуса кривизны вершин выступов режущего микрорельефа (т.е.  $r_3 = r_l$ ), который, как было установлено ранее, зависит от режимных параметров обработки: скорости резания ( $V$ ), деформации ( $\Delta Y$ ) эластичного полимерно-абразивного круга и подачи ( $S$ ). По результатам экспериментальных исследований установлена зависимость (3.40) радиуса кривизны вершин зерен от  $V$  (м/с),  $\Delta Y$  (мм) и  $S$  (мм/мин). Значения коэффициентов и свободного члена к уравнению (3.40) приведены в таблице 3.11.

Как было отмечено ранее (см. п. 3.3.1), тонкий поверхностный слой обрабатываемой поверхности по своим механическим свойствам существенно отличается от основного материала. Не учитывать данные отличия приповерхностного слоя и его роль в процессе взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью нельзя.

Для тонких финишных процессов обработки, каким является обработка эластичным полимерно-абразивным инструментом, целесообразно воспользоваться условием пластичности Мизеса-Губера [235]:  $K = \sigma_T / \sqrt{3}$  с экспериментальным поправочным коэффициентом. При расчете достижимой шероховатости обработанной поверхности, в уравнения (3.43) и (3.45) вводится коэффициент  $K_Y$ , который (в отличие от ранее рассмотренного коэффициента  $K_n$  при расчете съема материала) учитывает не только глубину внедрения абразивных зерен в тонкий поверхностный слой обрабатываемого материала, но и напыл материала и упругое его восстановление. Таким образом, в уравнении (3.43):  $K = K_Y \cdot (\sigma_T / \sqrt{3})$ .

Поскольку глубина внедрения зерен зависит от скорости резания  $V$  и деформации эластичного полимерно-абразивного инструмента  $\Delta Y$ , то коэффициент  $K_Y$  можно определить по экспериментально установленному выражению:

$$K_Y = (d_1 \cdot V^2 + d_2 \cdot V + d_3) \cdot (d_4 \cdot \Delta Y^3 + d_5 \cdot \Delta Y^2 + d_6 \cdot \Delta Y + d_7). \quad (3.46)$$

Данная зависимость установлена в результате комплекса специально проведенных исследований. В уравнении (3.46) режимы –  $\Delta Y$  в мм,  $V$  в м/мин, а значения коэффициентов приведены в таблице 3.13.

**Таблица 3.13 – Значения коэффициентов и свободного члена в (3.46)**

Коэффициент	FS-WL 8A MED	FS-WL 6S FIN	FS-WL 2S CRS	DB-WL 8S MED	CF-FB 0,5A FIN
$d_1$	$-3,533 \cdot 10^{-6}$	$1,328 \cdot 10^{-5}$	$-8,445 \cdot 10^{-6}$	$1,144 \cdot 10^{-6}$	$3,76 \cdot 10^{-6}$
$d_2$	$-1,875 \cdot 10^{-3}$	-0,0521	-0,0247	$-9,887 \cdot 10^{-3}$	$-5,762 \cdot 10^{-3}$
$d_3$	19,616	45,699	45,927	18,464	275,121
$d_4$	-0,24	-0,4572	-0,075	-10,352	-0,05867
$d_5$	1,412	1,1165	0,982	47,516	0,856
$d_6$	-3,236	-0,148	-4,422	-71,246	-4,48533
$d_7$	3,487	0,253	7,085	35,896	9

Разработанные теоретические математические модели, предназначенные для расчета достижимой шероховатости обработанной поверхности по параметру  $Ra$ , реализованы в виде программного обеспечения с использованием приложения Borland C++ Builder 6.0. Исходный код данной программы приведен в п. А.3.4 приложения А, а диалоговое окно приведено на рисунке А.3 приложения А. Данная программа отражает теоретические положения для случая контакта эластичного полимерно-абразивного круга с плоской обрабатываемой поверхностью, поскольку экспериментальные исследования были проведены при данных условиях.

#### ***Экспериментальное исследование шероховатости обработанной поверхности***

Для проведения экспериментальных исследований использовались эластичные полимерно-абразивные круги компании 3М, изготовленные из абразивного материала Scotch-Brite™. (см. рисунки 2.5 – 2.7). Параметры данных эластичных полимерно-абразивных кругов приведены в таблице 3.1.

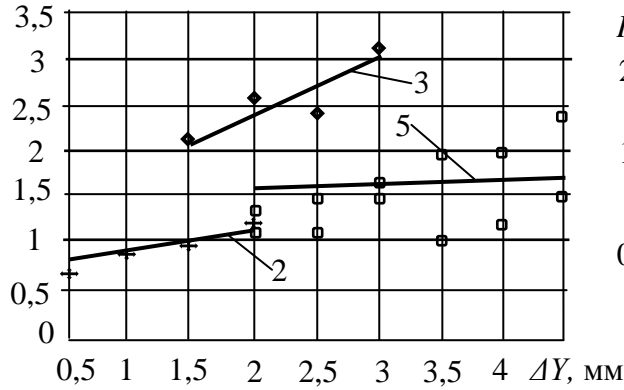
В качестве обрабатываемого материала использован сплав В95пчТ2, как типовой представитель высокопрочных алюминиевых сплавов, широко применяемых в авиастроении.

Эксперименты по установлению зависимостей параметров шероховатости от режимных параметров обработки проводились на опытных образцах (см. рисунок 2.13) на универсально-фрезерном станке, приведенном на рисунке 2.17. Продольная и поперечная шероховатость по параметру  $Ra$  измерялась на профилометре, описанном в п. 2.4.2 (см. рисунок 2.23).

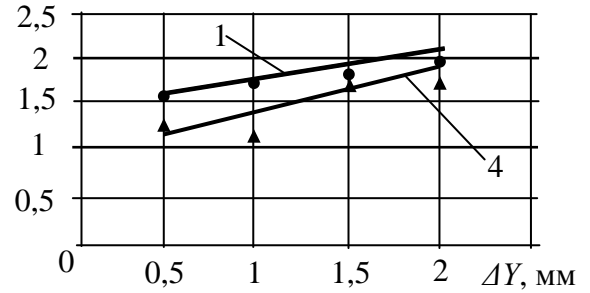
На рисунках 3.27, 3.28 и 3.29 приведены зависимости поперечной шероховатости по параметру  $Ra$  от режимных параметров обработки.

Установлено, что поперечная шероховатость с увеличением деформации растет. Это объясняется тем, что с увеличением деформации растет вертикальная составляющая силы, а, следовательно, увеличивается глубина внедрения единичных зерен в обрабатываемый материал.

$Ra$ , мкм



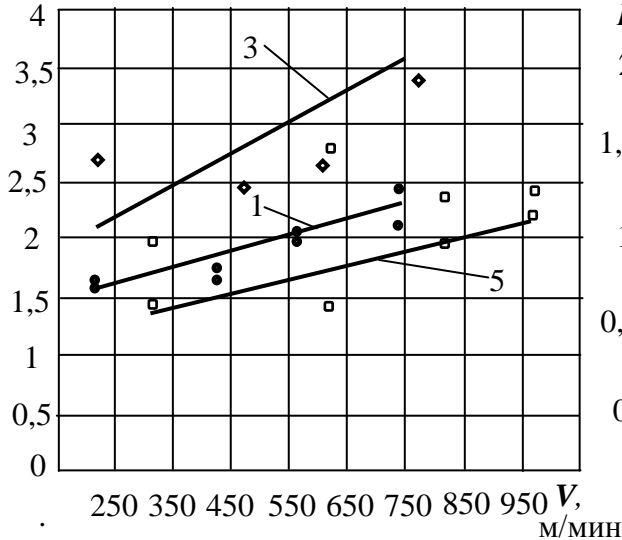
$Ra$ , мкм



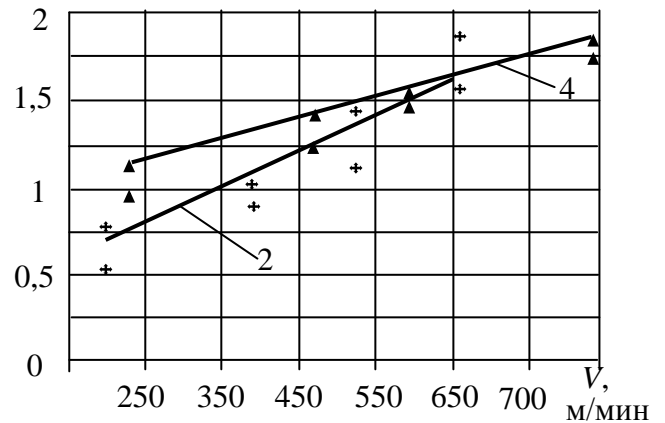
1 – FS-WL 8A MED при  $V = 441,4$  м/мин; 2 – FS-WL 6S FIN при  $V = 406,8$  м/мин;  
3 – FS-WL 2S CRS при  $V = 464,4$  м/мин; 4 – DB-WL 8S MED при  $V = 464,3$  м/мин;  
5 – CF-FB 0,5A FIN при  $V = 606,3$  м/мин.

**Рисунок 3.27 – Зависимость параметра шероховатости  $Ra$  от деформации  $\Delta Y$  при  $S = 130$  мм/мин для кругов**

$Ra$ , мкм



$Ra$ , мкм



1 – FS-WL 8A MED при  $\Delta Y = 1,5$  мм; 2 – FS-WL 6S FIN при  $\Delta Y = 1,5$  мм; 3 – FS-WL 2S CRS при  $\Delta Y = 2,5$  мм; 4 – DB-WL 8S MED при  $\Delta Y = 1,5$  мм; 5 – CF-FB 0,5A FIN при  $\Delta Y = 4$  мм.

**Рисунок 3.28 – Зависимость параметра шероховатости  $Ra$  от скорости резания  $V$  при подаче  $S = 130$  мм/мин для кругов**

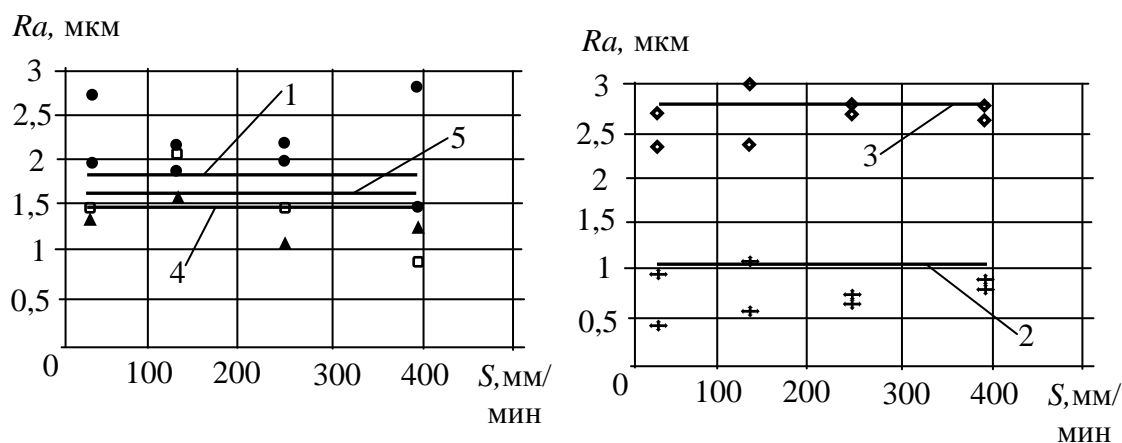
С увеличением скорости резания поперечная шероховатость также растет. Это объясняется тем, что с увеличением скорости растет центробежная составляющая силы удара абразивного зерна по обрабатываемой поверхности.

От продольной подачи поперечная шероховатость не зависит. Это хорошо видно на рисунке 3.29 и подтверждено дисперсионным анализом при доверительной вероятности 0,95 [199], результаты которого приведены в таблице 3.14.

Следует отметить, что на рисунках 3.27–3.29 линиями построены зависимости, полученные путем теоретических расчетов, а точками – экспериментальные данные.

Закключение о незначимости влияния рассматриваемого фактора  $S$  на шероховатость  $Ra$  получено с использованием критерия Фишера (см. п. 2.5.2).  $F_{0,95}$  – критерий Фишера при дове-

рительной вероятности 0,95. Этот критерий при степенях свободы  $f_1 = k - 1 = 3$  и  $f_2 = k(n - 1) = 20$  по справочным данным [199] равен  $F_{0,95} = 3,1$ .



1 – FS-WL 8A MED при  $V = 441,4$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм; 2 – FS-WL 6S FIN при  $V = 406,8$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм; 3 – FS-WL 2S CRS при  $V = 457,9$  м/мин,  $\Delta Y = 2,5$  мм; 4 – DB-WL 8S MED при  $V = 464,3$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм; 5 – CF-FB 0,5A FIN при  $V = 606,3$  м/мин,  $\Delta Y = 4$  мм.

**Рисунок 3.29 – Зависимость параметра шероховатости  $Ra$  от продольной подачи  $S$  для кругов**

**Таблица 3.14 – Результаты дисперсионного анализа зависимостей  $Ra$  от подачи  $S$**

Марка круга	Функция	$S_A^2$ , мкм <sup>2</sup>	$S_0^2$ , мкм <sup>2</sup>	$F = S_A^2 / S_0^2$	Значимость влияния фактора
FS-WL 8AMED	$Ra = f(S)$	0,053	0,259	0,204	не значимо
FS-WL 6SFIN		0,036	0,044	0,812	не значимо
FS-WL 2SCRS		0,127	0,096	1,327	не значимо
DB-WL 8SMED		0,145	0,072	2,007	не значимо
CF-FB 0,5AFIN		0,263	0,125	2,106	не значимо

В таблицах А.15 – А.19 (п. А.3.6 приложения А) приведены экспериментальные, статистически обработанные значения шероховатости  $Ra_{\text{Э}}$  и расчетные  $Ra_{\text{T}}$ . По приведенным в этих таблицах данным видно, что результаты, полученные путем расчетов по разработанным теоретическим моделям, хорошо коррелируют с экспериментальными данными. Проверка соответствия теоретически рассчитанных значений поперечной шероховатости экспериментальным данным при изменении деформации круга  $\Delta Y$  и скорости резания  $V$  проведена согласно п. 2.5 и представлена в виде доверительных границ отклонений экспериментальных данных от теоретически полученных, которые составляют  $\pm 0,13$  мкм при доверительной вероятности  $P = 0,95$ .

В производственных условиях, разработанные теоретические модели могут быть использованы при наличии соответствующего программного обеспечения, при его отсутствии рекомендовано использование упрощенных зависимостей (А.5), полученных путем аппроксимации данных, рассчитанных теоретически и приведенных в п. А.3.7 приложения А.

Исследования достижимой продольной шероховатости показали, что  $Ra_{\text{прод}}$  для всех использованных эластичных полимерно-абразивных кругов не зависит от заданных режимных параметров обработки. Дисперсионным анализом результатов экспериментов доказано, что при

уровне значимости  $P=0,95$  по критерию Фишера влияния  $\Delta Y$ ,  $V$  и  $S$  на  $Ra_{prod}$  являются незначимыми (данная методика описана в п. 2.5.2). Численное значение достижимой продольной шероховатости зависит только от характеристик эластичного полимерно-абразивного круга (зернистость, жесткость и т.д.)

После исключения грубых промахов во всей совокупности экспериментальных данных, которые составляли от 48 до 72 измерений, с использованием квантилей Стьюдента, определены доверительные границы достижимой  $Ra_{prod}$ . В таблице 3.15 приведены эти границы, а также предельные экспериментальные значения.

**Таблица 3.15 – Доверительные границы достижимой  $Ra_{prod}$  и предельные экспериментальные значения**

Круг	$Ra_{prod}$	$Ra$ (max)	$Ra$ (min)
FS-WL-8AMED	$0,02 \leq M(Ra_{prod}) \leq 0,478$	0,49	0,06
FS-WL-6SFIN	$0,018 \leq M(Ra_{prod}) \leq 0,508$	0,59	0,07
FS-WL-2SCRS	$0,124 \leq M(Ra_{prod}) \leq 0,68$	0,7	0,17
DB-WL-8SMED	$0 \leq M(Ra_{prod}) \leq 0,49$	0,47	0,06
CF-FB-0,5AFIN	$0,184 \leq M(Ra_{prod}) \leq 0,722$	0,69	0,22

Разработанные теоретические подходы, позволяющие оценивать формирование микрогеометрии поверхности детали, основанные на взаимодействии режущего микрорельефа эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью, позволяют прогнозировать шероховатость обработанной поверхности по известным параметрам инструмента, в зависимости от режимов обработки.

Упрощенная зависимость (см. п. А.3.7 приложения А) параметра шероховатости  $Ra$  от режимных параметров обработки, позволяет в производственных условиях легко определить ожидаемую шероховатость при проектировании технологического процесса изготовления детали.

Если в технической документации на изделие есть ограничения по продольной шероховатости, то, пользуясь таблицей 3.15, можно выбрать марку эластичного полимерно-абразивного круга, который позволит обеспечить требуемое значение продольной шероховатости.

Математическую модель формирования поверхностного слоя по шероховатости при обработке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами, которая является подсистемой четвертого уровня, следует считать устойчивой в связи с тем, что воздействие возмущающих факторов (входных параметров) корректируется системой управления, рассмотренной в п. 2.1.2 и п. 7.1.

На основании проведенных многочисленных экспериментов можно отметить, что из всех исследованных полимерно-абразивных кругов наиболее эффективными являются: FS-WL 2S CRS – прессованный, высокопористый, обладающий самой низкой засаливаемостью и хорошей вентиляцией воздуха в увеличенных порах; CF-FB 0,5A FIN – очень эластичный, собран-

ный из лепестков нетканого абразивсодержащего материала Clean & Finish, обладающий хорошей облегаемостью переменных по форме поверхностей и кромок.

### **3.5 Математическое моделирование температуры в зоне контакта при обработке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами**

#### **3.5.1 Теоретическое исследование температуры в зоне контакта эластичного полимерно-абразивного круга и обрабатываемой поверхности**

Эластичный абразивный инструмент, связкой которого является полимер, очень чувствителен к температуре, возникающей в процессе обработки. Высокая температура может привести к оплавлению поверхностного слоя круга и его катастрофическому износу, что недопустимо. Поэтому, при назначении режимных параметров обработки, необходимо учитывать температуру, возникающую в зоне контакта эластичного полимерно-абразивного круга и обрабатываемой поверхности.

Если сделать предположение, что вся теплота, которая выделяется при взаимодействии эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью, быстро и равномерно распределяется по всему объему заготовки и инструмента, то она будет отводиться в пространство. Однако, в реальных условиях, большое количество теплоты концентрируется в зоне контакта инструмента с поверхностью детали. Как следствие, температуру в этой зоне существенно повышается. В результате имеет место быстрый износ инструмента и даже, возможно, изменение структуры тончайшего слоя обработанной поверхности.

Теплообразование при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами следует рассматривать как процесс, который осуществляется активными зернами, расположение которых на режущей поверхности инструмента имеет случайный характер. При этом сам процесс обработки, аналогично обработке лепестковыми кругами, также следует рассматривать как стохастический [60].

Как было установлено ранее (см. п. 3.1), реализацией случайного процесса распределения зерен по режущей поверхности инструмента является профилограмма данной режущей поверхности. При этом, приработанный микрорельеф, участвующий в процессе обработки, имеет микрогеометрию, которая формируется в результате самозатачивания. Самозатачивание происходит в результате износа и выпадения зерен, а также износа полимерной связки круга.

Проводя теплофизический анализ процесса обработки эластичными полимерно-абразивными кругами, по аналогии с обработкой поверхностей лепестковыми кругами, рассмотренной в работе [60], необходимо учитывать как локальную температуру, возникающую в месте действия единичного зерна, так и общее повышение температуры поверхности обрабатываемой заготовки под влиянием других зерен, прошедших ранее через зону контакта.

Следует отметить, что при проведении расчетов сделано допущение о том, что можно пренебречь теплотой, возникающей при трении полимерной связки об обрабатываемую поверхность, поскольку она существенно меньше теплоты, которая образуется в процессе резания абразивным зерном.

Общая тепловая мощность процесса  $Q_M$  (Вт) возникает под действием силы  $P$  со скоростью  $V$ :  $Q_M = P \cdot V$ .

Приходная часть теплового баланса, согласно [60, 201], при механической обработке, к которой следует отнести и обработку эластичным полимерно-абразивным инструментом, может быть представлена формулой:  $Q_M = Q_d + \sum_{i=1}^m Q_{тi}$ ,

где  $Q_d$  – теплота, эквивалентная работе деформации;  $Q_{тi}$  – теплота, эквивалентная работе трения на каждом из  $m$  участков, где она возникает.

Скорость перемещения источников в данном случае можно охарактеризовать безразмерным критерием Пекле [60, 201]:  $Pe = \frac{V_{ист} \cdot l_{ист}}{\omega}$ ,

где  $V_{ист}$  – скорость движения источника, м/с;  $l_{ист}$  – характерный размер источника, см;  $\omega$  – коэффициент температуропроводности тела, в котором движется источник, см<sup>2</sup>/с.

Скорость перемещения быстродвижущегося источника (при  $Pe \geq 10$ ), которому соответствует процесс резания при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами, превышает скорость распространения теплоты в данном теле. Таким образом, следует сделать вывод, аналогичный [60], о том, что теплота не может распространяться впереди источника по направлению движения, а может распространяться только под источником и позади него.

Известно [60, 201], что время действия источника при расчетах описывается безразмерным критерием Фурье:  $F_0 = \frac{\omega \cdot \tau}{l_{ист}^2}$ ,

где  $\tau$  – время, с.

Метод источников заключается в том, что в основе математических расчетов лежит описание температурного поля, которое возникает вследствие действия теплоты, вносимое импульсом точечного источника, в неограниченном теле. При рассматриваемом методе обработки в роли единичного источника следует рассматривать единичное абразивное зерно эластичного полимерно-абразивного круга. Согласно [60, 201], вышеописанное температурное поле можно выразить следующим образом:  $\Theta(x, y, z, t) = \frac{Q_m}{\lambda_t \cdot \sqrt{\omega \cdot (4\pi \cdot t)^{3/2}}} \cdot \exp\left[-\frac{R_l^2}{4\omega \cdot t}\right]$ ,

где  $\Theta(x, y, z, t)$  – температура точки тела с координатами  $x, y, z$ , которая возникает через  $t$ , с после того, как в точке с координатами  $x_u, y_u, z_u$  возник тепловой импульс;  $\lambda_t$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(см·°С);

$R_l$  – расстояние от точки до источника, см.:  $R_l = \sqrt{(x_u - x)^2 + (y_u - y)^2 + (z_u - z)^2}$ .

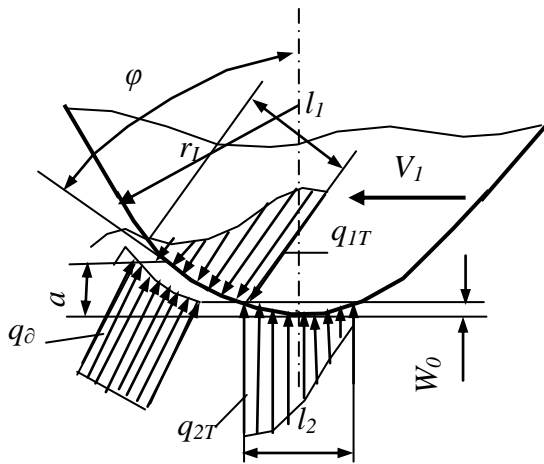


Геометрическую площадь зоны контакта эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью необходимо представлять в виде геометрической фигуры, которая частично занята пятнами фактического контакта зерен с поверхностью.

Под действием окружной силы резания  $P_z$  тепловыделение (Вт) в зоне работы каждого активного зерна составляет:  $Q_m = P_z^l \cdot V$ ,

где  $P_z^l$  – средняя тангенциальная сила резания на одном зерне, Н;  $V$  – скорость круга, м/с.

На рисунке 3.30 представлена схема, согласно которой можно производить расчет локальной температуры в зоне работы режущего зерна. В качестве модели абразивного зерна принят (в соответствии с работой [57]) конус с закругленной по радиусу  $r_l$  вершиной.



**Рисунок 3.30 – Схематизация режущего выступа абразивного зерна и расположение источников тепловыделения**

В зоне резания, при рассматриваемом способе обработки, согласно [60, 201], возникают три основных источника теплоты:

- теплота деформации в зоне образования стружки (диспергирование материала зерном) (интенсивность источника  $q_d$ );
- теплота трения, возникающая на площадке контакта между стружкой и передней поверхностью абразивного зерна ( $q_{1T}$ );
- теплота трения, возникающая между задней поверхностью абразивного зерна и обрабатываемой поверхностью ( $q_{2T}$ ).

Средневероятное значение элементарной толщины удаляемого слоя  $a$  (мм) (см. рисунок 3.30) соответствует математическому ожиданию внедрения единичного зерна в обрабатываемый материал (3.7), то есть:  $a = y_E$ .

Длины участков контакта по передней  $l_1$  и задней  $l_2$  поверхностям (см. рисунок 3.30) составляют:

$$l_1 = \sqrt{2a \cdot r_l + \frac{1}{3}a^2}; \quad l_2 = 2\sqrt{2w_o \cdot r_l - w_o^2},$$

где  $r_l$  – реальный радиус кривизны вершин зерен, который, как было установлено ранее (3.40), зависит от режимных параметров обработки ( $V$ ,  $\Delta Y$  и  $S$ );

$$W_o - \text{упругая деформация материала заготовки: } w_o = \sqrt[3]{\frac{9\pi^2}{16r_l} \cdot \left(\frac{1-\mu^2}{\pi \cdot E}\right)^2 \cdot P_y^1{}^2};$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости первого рода, Мпа.

$P_z^l$ ,  $P_y^l$  – средние значения тангенциальной и нормальной составляющих силы резания на единичном зерне по уравнению (3.31).

Температура в зоне действия единичного зерна при интенсивности источника  $q_d$ , согласно [60, 201], определится выражением:

$$\theta_d \approx \frac{0,3352\omega}{1+0,5\sqrt{\frac{\omega}{V \cdot a}}} \cdot \frac{P_z^1 - 0,26P_y^1}{\lambda \cdot a^2}, \quad (3.47)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(см·°C);  $\omega$  – коэффициент температуропроводности, см<sup>2</sup>/с.

Расчет средневероятных температур на поверхностях контакта зерна с обрабатываемой поверхностью, согласно [60, 201], целесообразно разделить на следующие этапы:

- 1) вычисления средневероятных температур  $\Theta_c$  и  $\Theta_u$  на поверхностях контакта стружки и обрабатываемой поверхности, которые не учитывают отвод теплоты в зерно;
- 2) вычисления средневероятных температур, которые возникают со стороны зерна;
- 3) сопоставления результатов, полученных в ходе выполнения первых двух этапов, а также решения балансовой задачи и уточнения значений температур, которые необходимо получить с учетом теплоотвода в зерно и связку эластичного полимерно-абразивного круга.

Средневероятная температура на поверхности контакта стружки с обрабатываемой поверхностью, не учитывающая отвод тепла в зерно (ширина стружки  $b \approx 2a$ , усадка стружки  $k \approx 2$ ):

$$\Theta_c = \Theta_d + \frac{0,0183}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot l_1}{V}} \cdot q_{1T},$$

где  $q_{1T}$  – интенсивность отвода тепла в режущий инструмент (в данном случае - абразивное зерно) со стороны стружки, Вт/см<sup>2</sup>:  $q_{1T} = 6,327 \cdot \frac{V}{a^2} \cdot (P_y^1 - P_z^1)$ .

Средневероятная температура, возникающая на поверхности детали (без учета отвода тепла в зерно), аналогично [60], определяется по формуле:  $\Theta_u = \Theta_d \cdot T_u + \frac{0,013}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot l_2}{V}} \cdot q_{2T}$ ,

где  $T_u$  – функция, отображающая закон распределения температур на площадке контакта детали с абразивным зерном, вызванных теплотой деформации:  $T_u \approx \sqrt{1 + \xi} - \sqrt{\xi}$ ,

где  $\xi$  – безразмерная функция:  $\xi = \frac{l_2}{2a} \cdot tg\Phi \approx 0,13 \cdot \frac{l_2}{a}$  ( $\Phi$  – угол сдвига); (3.48)

$q_{2T}$  – интенсивность теплоотвода в режущий инструмент (в данном случае – абразивное зерно) со стороны детали, Вт/см<sup>2</sup>:  $q_{2T} = 50,0286 \cdot \mu_2 \cdot \sigma_b \cdot V$ . (3.49)

В уравнении (3.49)  $\mu_2$  – коэффициент трения;  $\sigma_b$  – временное сопротивление разрыву материала детали, МПа.

При расчете температуры, возникающей со стороны абразивного зерна, необходимо учитывать:

- тот факт, что зерно работает только в области своего режущего выступа;
- конечность размеров зерна;
- нестационарность процесса теплообмена;
- зерно удерживается связкой, в связи с чем отдает часть поступившей в него теплоты в тело эластичного полимерно-абразивного круга.

Безразмерное время, которое также называется критерием Фурье, можно выразить уравнением [60, 201]:  $F_{01} = \frac{0,4 \cdot \omega_p \cdot L_k}{V \cdot x^2}$ ,

где  $\omega_p$  – коэффициент температуропроводности зерна, см<sup>2</sup>/с;  $x$  – средневероятный размер абразивного зерна, мм (см. таблицу 3.1);  $L_k$  – длина участка контакта эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью определяется по выражению (3.34) при обработке плоскости, (3.35) при обработке наружной цилиндрической поверхности и (3.36) при обработке внутренней цилиндрической поверхности.

Согласно [60, 201], распределение интенсивности тепловых потоков в зависимости от сил трения, возникающих на контактных поверхностях, целесообразно принять согласно закону несимметричного нормального распределения.

Уравнения, описывающие равенство средних температур на каждой из площадок контакта стружка–зерно и обрабатываемая поверхность–зерно, имеют вид аналогичный уравнениям, полученным в [60]:

$$\left. \begin{aligned} \Theta_c - a_3 \cdot q_1 &= b_3(q_1 \cdot l_1 + c_2 \cdot q_2 \cdot l_2), \\ \Theta_n - a_4 \cdot q_2 &= b_3(q_2 \cdot l_2 + c_1 \cdot q_1 \cdot l_1), \end{aligned} \right\} \quad (3.50)$$

где  $q_1$  и  $q_2$  – тепловые потоки на поверхности контакта зерна со стружкой и с деталью в Вт/см<sup>2</sup>, которые можно определить совместным решением уравнений (3.50):

$$q_2 = \frac{\theta_c \cdot b_3 \cdot c_1 \cdot l_1 - \theta_n \cdot (a_3 + b_3 \cdot l_1)}{b_3^2 \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot l_1 \cdot l_2 - (b_3 \cdot l_2 + a_4) \cdot (a_3 + b_3 \cdot l_1)},$$

$$q_1 = \frac{\theta_c - b_3 \cdot c_2 \cdot l_2 \cdot q_2}{a_3 + b_3 \cdot l_1}.$$

Показатели  $c_1, c_2, a_3, a_4, b_3$  в уравнениях (3.50) имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= 0,85 \cdot \left(1 - \frac{2a}{l_2}\right); c_2 = 0,6 \cdot \left(1 + \frac{a}{l_2}\right); a_3 = \frac{0,034}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot l_1}{V}}; \\ a_4 &= \frac{0,024}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot l_2}{V}} \cdot K_c; b_3 = 0,072 \cdot \frac{a \cdot f_1 \cdot \eta^*}{\lambda \cdot x}, \end{aligned} \right\} \quad (3.51)$$

где  $K_c$  – коэффициент формы источника:  $K_c = 1,1 \cdot a^{0,4} \cdot \left(\frac{V}{\omega \cdot l_2}\right)^{0,2}$ ;

$\eta^*$  – коэффициент снижения температуры рабочего выступа на зерне, возникающий в связи с теплоотводом в массу круга:  $\eta^* = 1 - 0,68 \cdot \frac{\lambda_k}{\lambda_p} \cdot \frac{F_{01}}{1 + 1,37 \cdot \frac{\lambda_k}{\lambda_p} \cdot F_{01}} \cdot \left(1 + \frac{f_2}{f_1}\right)$ . (3.52)

В уравнениях (3.51) и (3.52) приняты следующие обозначения:

$\lambda_k$  и  $\lambda_p$  – коэффициенты теплопроводности материала круга и зерна, Вт/(см·°С);

$f_1$  и  $f_2$  – коэффициенты, зависящие от критерия Фурье  $F_{01}$ :

$$f_1 = a_1 + b_1 \cdot F_{01}; f_2 = a_2 + b_2 \cdot F_{01}.$$

Значения параметров  $a_1, a_2, b_1, b_2$  зависят от критерия Фурье и представлены в таблице 3.16 согласно справочным данным, приведенным в [201].

**Таблица 3.16 – Значения параметров  $a_1, a_2, b_1, b_2$**

$F_{01}$	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$
< 1	8,0	1,12	~ 0	~ 0
1–5	7,86	1,26	-1,07	1,67
5–20	4,94	1,84	-2,08	1,86
20–50	1,02	2,04	-5,49	2,04
50–100	-7,63	2,24	-14,3	2,21

Температура на зерне в °С со стороны стружки определяется по выражению:

$$\theta_1 = \theta_c - a_3 \cdot q_1,$$

а со стороны детали:  $\theta_2 = \theta_{II} - a_4 \cdot q_2$ .

Доля теплоты, отнесенная к полному тепловыделению и поступающая в деталь через поверхность сдвига, а также через площадку контакта между обрабатываемой поверхностью и задней поверхностью абразивного зерна:  $\delta^* = 1,37 \cdot \frac{P_z^1 - 0,26 \cdot P_y^1}{P_z \cdot \left(1 + 2 \sqrt{\frac{V \cdot a}{\omega}}\right)} + 0,01 \cdot \frac{a \cdot l_2 \cdot (q_{2T} - 2q_2)}{P_z \cdot V}$ .

Суммарное влияние всех зерен эластичного полимерно-абразивного круга на локальную температуру под данным абразивным зерном определяется в соответствии с [60] как:

$$\theta_{\Sigma} = 1,563 \cdot \frac{P_z \cdot V \cdot \delta^*}{\lambda \cdot L_k \cdot \sqrt{n_p}} \cdot \left[ \ln N_{\text{имп}} + C_3 + \frac{10}{\rho_n^{0,15}} \cdot \exp(-3\sqrt{\rho_n}) \right]. \quad (3.53)$$

В формуле (3.53),  $C_3 = 0,57722$  – постоянная Эйлера;  $n_p$  – среднеевероятное количество активных (работающих) зерен на единице поверхности контакта эластичного полимерно-абразивного круга с деталью, которое, определяется по формуле (3.42);  $P_z$  – суммарная составляющая тангенциальной силы резания на всей площадке контакта (3.41);  $N_{\text{имп}}$  – число тепловых импульсов. При обработке цилиндрическим кругом [60]:

$$N_{\text{имп}} = \frac{60 \cdot V}{S} \cdot B \cdot \sqrt{n_p \cdot L_k};$$

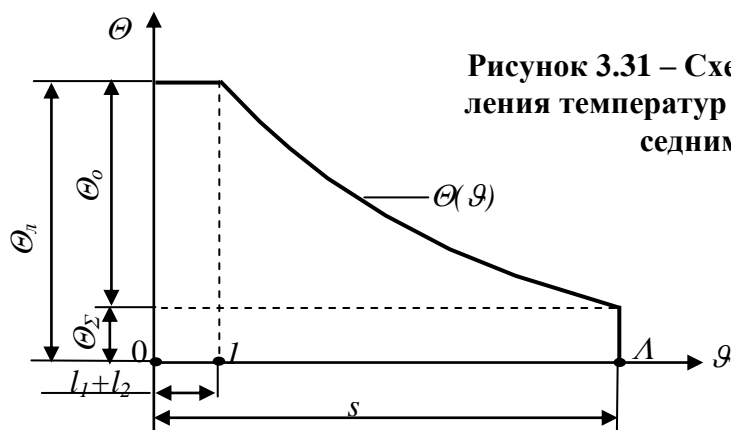
где  $S$  – продольная подача;  $\rho_n$  – безразмерная величина, равная отношению критерия Пекле к числу тепловых импульсов:  $\rho_n = \frac{Pes}{N_{\text{имп}}}$ . (3.54)

Безразмерный критерий Пекле в зависимости (3.54) вычисляется следующим образом:

$$Pes = 2,5 \cdot \frac{V \cdot s}{\omega},$$

где  $s$  – среднеевероятный шаг между активными абразивными зернами,  $s = l/m$ ;  $m$  – число вершин по профилограмме поверхности круга,  $\text{мм}^{-1}$  (см. таблицу 3.6).

Схематизированная кривая распределения температур на участке между двумя соседними зернами  $s$  показана на рисунке 3.31. По оси абсцисс отложены безразмерные длины  $\mathcal{G} = x/l_2$ , по оси ординат – температура. Похожая кривая получена автором работ [58, 60] для случая контакта лепесткового круга с обрабатываемой поверхностью, а автором [201] – в процессе математического описания процессов шлифования.



**Рисунок 3.31 – Схематизированная кривая распределения температур на участке детали между двумя соседними активными зёрнами**

На участке  $0 \leq g \leq 1$  средневероятная локальная температура на поверхностях контакта абразивного зерна с деталью:  $\Theta_{л} = \Theta_0 + \Theta_{\Sigma}$ , (3.55)

где  $\Theta_0 = \frac{\Theta_1 \cdot l_1 + \Theta_2 \cdot l_2}{l_1 + l_2}$ .

При  $1 \leq g \leq \Lambda$  (где  $\Lambda$  – безразмерная длина  $\Lambda = s/l_2$ ) температура снижается до  $\Theta_{\Sigma}$ .

Средняя температура на этом участке определится уравнением:  $\Theta = \frac{3+g}{4g} \Theta_0 + \Theta_{\Sigma} + \Theta_{ок}$ ,

где  $\Theta_{ок}$  – температура окружающей среды.

### 3.5.2 Экспериментальное исследование температуры в зоне контакта эластичных полимерно-абразивных кругов с обрабатываемой поверхностью

Комплекс экспериментальных исследований проведен с помощью эластичных полимерно-абразивных кругов компании 3М (см. рисунки 2.5–2.7) и образцов из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2 (см. рисунок 2.13).

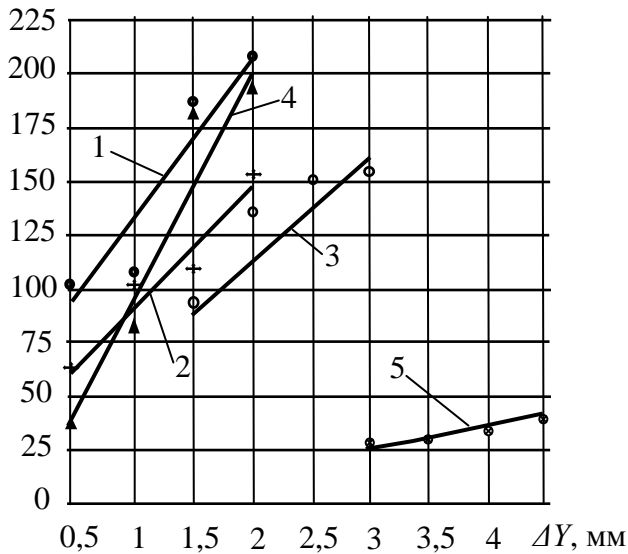
Для исследования температуры в зоне резания использован тепловизор FLIR Orion SC7000M (Швеция) (см. рисунок 2.26).

Проведены экспериментальные исследования по определению температуры в зоне резания в зависимости от режимных параметров обработки.

На рисунке 3.32 представлены зависимости температуры в зоне резания от радиальной деформации кругов, из которых видно, что с ростом радиальной деформации температура возрастает. Это происходит потому, что с ростом радиальной деформации увеличивается глубина внедрения единичных зерен в обрабатываемый материал и, как следствие, теплообразование в зоне контакта инструмента и детали увеличивается.

На рисунке 3.33 представлены зависимости температуры в зоне резания от скорости резания, из которых видно, что с ростом скорости резания температура увеличивается. Это происходит в результате того, что количество теплоты, выделяющейся в единицу времени, увеличивается пропорционально скорости резания.

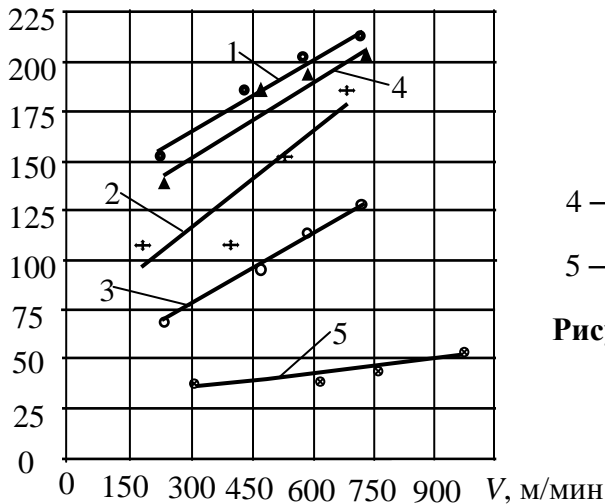
$\theta, ^\circ\text{C}$



- 1 – FS-WL 8A MED при  $V = 441,4$  м/мин;
- 2 – FS-WL 6S FIN при  $V = 406,8$  м/мин;
- 3 – FS-WL 2S CRS при  $V = 462,4$  м/мин;
- 4 – DB-WL 8S MED при  $V = 464,3$  м/мин;
- 5 – CF-FB 0,5A FIN при  $V = 606,3$  м/мин

**Рисунок 3.32 – Зависимость температуры в зоне резания от деформации  $\Delta Y$  для кругов при  $S = 130$  мм/мин**

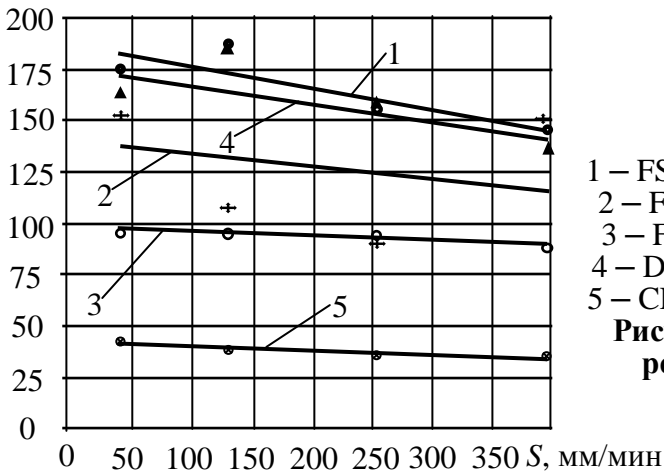
$\theta, ^\circ\text{C}$



- 1 – FS-WL 8A MED;
- 2 – FS-WL 6S FIN;
- 3 – FS-WL 2S CRS;
- 4 – DB-WL 8S MED при радиальной деформации  $\Delta Y = 1,5$  мм;
- 5 – CF-FB 0,5A FIN при радиальной деформации  $\Delta Y = 4,5$  мм.

**Рисунок 3.33 – Зависимость температуры в зоне резания от скорости резания  $V$  для кругов при  $S = 130$  мм/мин**

$\theta, ^\circ\text{C}$



- 1 – FS-WL 8A MED при  $V = 441,4$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм;
- 2 – FS-WL 6S FIN при  $V = 406,8$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм;
- 3 – FS-WL 2S CRS при  $V = 462,4$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм;
- 4 – DB-WL 8S MED при  $V = 464,3$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм;
- 5 – CF-FB 0,5A FIN при  $V = 606,3$  м/мин,  $\Delta Y = 4,5$  мм.

**Рисунок 3.34 – Зависимость температуры в зоне резания от продольной подачи  $S$  для кругов**

На рисунке 3.34 представлены зависимости температуры в зоне резания от продольной подачи, из которых видно, что с ростом продольной подачи значения температуры уменьшаются. Это происходит потому, что с увеличением продольной подачи уменьшается время обработки, а, следовательно, уменьшается и общее количество выделившейся теплоты.

Следует отметить, что на рисунках 3.32–3.34 линиями показаны зависимости, построенные по предложенной теоретической математической модели, а точками обозначены экспериментальные данные.

### 3.5.3 Результаты аналитического расчета температуры при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами и сопоставления его с экспериментальными данными

Для подтверждения адекватности предложенных теоретических моделей по определению температуры, возникающей в зоне контакта эластичных полимерно-абразивных кругов с обрабатываемой поверхностью, проведены расчеты средневероятной локальной температуры на рабочей поверхности контакта зерна с деталью  $\theta_l$  и средней температуры на участке между зернами  $\theta$ .

*Исходные данные:*

1. Обрабатываемый материал: высокопрочный алюминиевый сплав В95пчТ2,  $\sigma_s = 500$  МПа,  $E = 70000$  МПа,  $\mu = 0,33$ ,  $\lambda = 0,7123$  Вт/(см<sup>3</sup>С), или  $c\rho = 0,05489$  Дж/(см<sup>3</sup>С),  $\omega = 0,5$  см<sup>2</sup>/с,  $K = 760$  МПа

2. Зерно:

- электрокорунд белый:  $\lambda_p = 0,19693$  Вт/(см<sup>3</sup>С),  $c\rho = 0,1026252$  Дж/(см<sup>3</sup>С),  $\omega_p = 0,11$  см<sup>2</sup>/с, коэффициент трения  $\mu_2 = 0,3$ ;
- карбид кремния:  $\lambda_p = 0,15503$  Вт/(см<sup>3</sup>С),  $c\rho = 0,105012$  Дж/(см<sup>3</sup>С),  $\omega_p = 0,084$  см<sup>2</sup>/с, коэффициент трения  $\mu_2 = 0,3$ .

3. Круг  $\lambda_k = 0,003771$  Вт/(см<sup>3</sup>С)

4. Экспериментальная сила резания  $P_y$  и  $P_z$ .

5. Экспериментальная локальная температура  $\theta_{ЭК}$ , °С.

Результаты профилографирования режущего микрорельефа использованных кругов приведены в таблице 3.6. Результаты расчета температуры по предложенной методике приведены в таблицах А.21–А.25 (п. А.4 приложения А).

Результаты исследования показывают, что при обработке всеми использованными кругами локальная  $\theta_l$  и средняя  $\theta$  температуры с увеличением скорости резания  $V$  увеличиваются, поскольку общая тепловая мощность процесса возникает вследствие преобразования механической работы в теплоту, а механическая мощность процесса зависит от скорости резания. Это подтверждается формулой (3.47) температуры в зоне действия единичного зерна  $\theta_0$  и суммарным влиянием всех зерен круга на локальную температуру под данным зерном  $\theta_z$  (формула 3.53).

С увеличением деформации круга  $\Delta Y$  локальная  $\theta_L$  и средняя  $\theta$  температуры также возрастают. Это связано с увеличением длины участка контакта круга с деталью  $L_k$  и сил резания  $P_y$  и  $P_z$ , которые также влияют на механическую мощность процесса.

Продольная подача  $S$  влияет на температуру числом тепловых импульсов в процессе обработки  $N_{\text{имп}}$  (формула 3.53). С увеличением подачи число тепловых импульсов в зоне контакта круга с деталью, согласно формуле (3.53), уменьшается, что сопровождается уменьшением температуры.

Как видно из таблиц А.21–А.25 (см. п. А.4 приложения А), теоретически рассчитанная температура очень близка температуре, полученной экспериментально. Доверительные границы отклонений экспериментальных данных от теоретически полученных определяются согласно методике, изложенной в п. 2.5 и составляют:  $\pm 2,38^\circ\text{C}$  при доверительной вероятности  $P=0,95$ .

В производственных условиях, разработанные теоретические математические модели могут быть использованы при наличии соответствующего программного обеспечения, при его отсутствии рекомендовано использование упрощенных зависимостей, полученных путем аппроксимации данных, рассчитанных теоретически. Данные зависимости (А.6) приведены в п. А.4 приложения А.

При назначении режимов обработки недопустимо, чтобы температура резания оказалась выше температуры плавления полимерной связки круга.

Например, температура плавления полиамида-6 и капрона –  $215^\circ\text{C}$ , полиуретана –  $175^\circ\text{C}$ , полистирола –  $220^\circ\text{C}$ . Температура плавления полимерной связки рассматриваемых эластичных кругов приблизительно равна температуре плавления вышеперечисленных полимерных материалов и составляет порядка  $180\text{--}200^\circ\text{C}$ .

Разработанную математическую модель температуры в зоне обработки при зачистке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами, которая является подсистемой четвертого уровня, следует считать устойчивой в связи с тем, что воздействие возмущающих факторов (входных параметров) корректируется системой управления, рассмотренной в п. 2.1.2.

### **3.6 Остаточные напряжения, возникающие в поверхностном слое деталей после обработки эластичными полимерно-абразивными кругами**

Одним из показателей качества обработанной поверхности являются остаточные напряжения, оказывающие значительное влияние на эксплуатационные свойства изделий.

Целью нижеописанных исследований является установление влияния режимных параметров обработки (скорости резания и деформации круга) на величину и распределение остаточных напряжений в поверхностном слое при зачистке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами. При этом остаточные напряжения формируются под влиянием сил резания и температуры, возникающей в процессе обработки. Таким образом, реализуется ситуация,



в которой суммарные напряжения могут быть представлены как суперпозиция напряжений от температуры и силы резания [20, 88].

Для проведения исследований использовались эластичные полимерно-абразивные круги компании 3М, изготовленные из абразивного материала Scotch-Brite™ (см. рисунки 2.5 и 2.7).

Параметры исследованных эластичных полимерно-абразивных кругов приведены в таблице 3.17.

В качестве обрабатываемого материала принят сплав В95пчТ2, как типовой представитель высокопрочных алюминиевых сплавов, широко используемых в авиастроении.

В основе определения остаточных напряжений после пластических деформаций лежит известная в теории пластичности теорема о разгрузке. В соответствии с этой теоремой, впервые указанной Генки (1924 г.), *остаточные напряжения равны разности между истинными напряжениями в упруго-пластическом теле и теми напряжениями, которые создавались бы в нем при предположении об идеальной упругости материала.* [23].

**Таблица 3.17 – Параметры эластичных полимерно-абразивных кругов**

Марка круга	$D_k$ мм	$B_k$ мм	$r_k$ мм	$d_k$ мм	$M_k$ кг	$\gamma_k$ кг/м <sup>3</sup>	Абразив	Зернистость $Z$ , мкм
FS-WL-8AMED	140,5	26	17,5	25,4	0,278	712,77	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,	50–60
CF-FB-0,5AFIN	193	50	45	76,5	0,418	339,03	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,	45–50
Примечание. $D_k$ – диаметр круга, мм; $B_k$ – ширина круга, мм; $r_k$ – радиус втулки круга, мм; $d_k$ – диаметр отверстия, мм; $M_k$ – масса круга, кг; $\gamma_k$ – плотность материала круга, кг/м <sup>3</sup>								

По теореме о разгрузке следует, что в теле остаются деформации и напряжения, полученные как разность их значений в истинном пластическом и фиктивном упругом состояниях.

Для определения остаточных напряжений, целесообразно воспользоваться понятием фиктивной силы, предложенной Безуховым Н.И. [20].

### 3.6.1 Математическое описание напряженного состояния детали под действием силы резания

Предположим, что в каждый момент времени деформация поверхностного слоя происходит только под действием одного сечения круга, перпендикулярного вектору скорости резания [88].

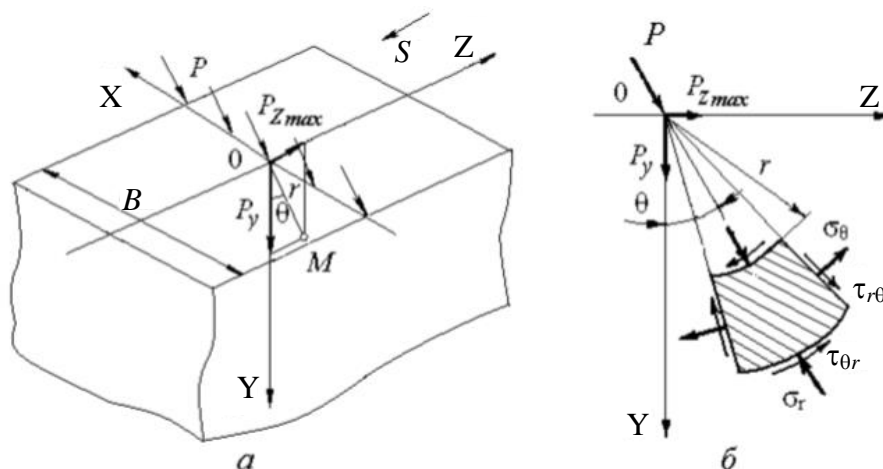
Допустим, что скоростью движения детали можно пренебречь и считать действующую относительно нее силу неподвижной, в этом случае решение можно свести к задаче о напряженном состоянии под действием линейной силы  $P$  (рисунок 3.35, а).

Основные уравнения, устанавливающие зависимости между напряжениями и деформациями в декартовой системе координат, следующие [55, 88, 98]:

$$\sigma_x - \sigma_{cp} = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} (\varepsilon_x - \varepsilon); \quad \sigma_y - \sigma_{cp} = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} (\varepsilon_y - \varepsilon); \quad \sigma_z - \sigma_{cp} = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} (\varepsilon_z - \varepsilon);$$

$$\sigma_{cp} = \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z); \quad \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0,$$

где  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальные напряжения в рассматриваемой точке, параллельные осям X, Y, Z;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  – деформации, соответствующие нормальным напряжениям;  $\sigma_{cp}$  и  $\varepsilon$  – средние напряжения и деформация,  $\sigma_i$  и  $\varepsilon_i$  – интенсивности напряжения и деформации.



**Рисунок 3.35 – Схема сил, действующих на поверхность (а), силы резания и напряжения в плоскости ZOY (б) [93, 94]**

В полярной системе координат  $r, \theta$  положение точки M полупространства определяется расстоянием  $r$  от начала координат O (рисунок 3.35, б) и углом  $\theta$  между этим направлением  $r$  и осью Y.  $\theta$  – угол действия силы резания.

Элемент среды на расстоянии  $r$  от точки приложения силы испытывает простое радиальное сжатие, т.е. тангенциальное напряжение  $\sigma_\theta = 0$ . Задача является симметричной, и поэтому в сечениях касательные напряжения  $\tau_{r\theta}$  не возникают. Учитывая эти условия, состояние равновесия сводится к одному уравнению:  $\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r}{r} = 0$  или  $\frac{\partial}{\partial r}(r\sigma_r) = 0$ .

Поскольку в процессе резания материал упрочняется [88, 116, 131], напряжения и деформации материала принимаем в виде степенной зависимости:  $\sigma_i = m_T \cdot \varepsilon_i^{n_d}$ , (3.56) где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжения,  $\varepsilon_i$  – интенсивность относительной деформации;  $n_d$  – показатель деформационного упрочнения материала;  $m_T$  – значение напряжения течения (напряжения, превышающего предел текучести), при котором логарифмическая деформация  $\varepsilon_1 = \ln(l/l_0)$  равна единице,  $l$  и  $l_0$  – конечная и исходная длины образца. Между логарифмической и относительной деформациями существует функциональная связь:  $\varepsilon_1 = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{1}{1-\varepsilon_m}$ . (3.57)

Показатель упрочнения материала  $n_d$  для высокопрочных алюминиевых сплавов приводится по ГОСТ 25.503–97.

Значение напряжения течения  $m_T$  (напряжения, превышающего предел текучести) зависит от характера взаимодействия эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемым материалом. Из уравнения (3.57) следует, что  $\ln \frac{1}{1-\varepsilon_m} = 1$ , где  $\varepsilon_m$  – деформация, при которой логарифмическая деформация равна единице.

Прессованный круг FS-WL-8A MED обладает более высокой жесткостью, для него значение  $n_d < 0,5$ , а  $m_T$  определится из (3.56) по выражению:  $m_T = \frac{\sigma_{0,2}}{\varepsilon_m n_d}$ , (3.58)

где  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести обрабатываемого материала (B95пчТ2).

Круг CF-FB-0,5A FIN – очень эластичный круг состоит из лепестков материала типа Clean & Finish. Для этого круга значение  $n_d \geq 0,5$ , а  $m_T$  определится из выражения:  $m_T = \frac{E}{\varepsilon_m}$ , (3.59) где  $E$  – модуль упругости материала (B95пчТ2).

Известно, что с увеличением температуры механические свойства обрабатываемого материала изменяются. В таблице 3.18 приведены данные по [136] для модуля упругости  $E$ , предела текучести  $\sigma_{0,2}$  и коэффициента линейного расширения  $\alpha_0$ .

**Таблица 3.18 – Механические свойства B95пчТ2 [136]**

$\Theta$ , °C	$E$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\alpha_0 \cdot 10^6$
20	70000	570	22
100	64500	510	23,6
150	61500	460	24,2
200	59500	360	26,2
250	50500	180	–

Для удобства использования в разрабатываемых теоретических положениях, приведенных в таблице 3.18 данных, предложены аппроксимирующие выражения:

$$E, \sigma_{0,2}, \alpha_0 = a \cdot \Theta^2 + b \cdot \Theta + c. \quad (3.60)$$

В таблице 3.19 приведены значения коэффициентов и свободного члена уравнения (3.60).

**Таблица 3.19 – Коэффициенты и свободный член в уравнении (3.60)**

Коэффициент	Механические свойства		
	$E$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\alpha_0$
$a$	-0,19398	$-8,495 \cdot 10^{-3}$	$-1,15942 \cdot 10^{-11}$
$b$	-32,40803	0,598	$2,13913 \cdot 10^{-8}$
$c$	$7,07258 \cdot 10^4$	561,438	$2,15768 \cdot 10^{-5}$

Значения показателя деформационного упрочнения материала определены экспериментально и представлены в виде уравнения регрессии в зависимости от деформации круга  $\Delta Y$  (в мм) и скорости резания  $V$  (в м/мин). Коэффициенты данного уравнения приведены в таблице 3.20.

$$n_d = a_1 \cdot \Delta Y^2 + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot \Delta Y + a_4 \cdot V + a_5 \cdot \Delta Y \cdot V + a_6. \quad (3.61)$$

**Таблица 3.20 – Коэффициенты и свободный член в уравнении (3.61)**

Круг	Коэффициент и свободный член					
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$
<b>FS-WL 8A MED</b>	0,061	$6 \cdot 10^{-7}$	-0,2311	$-3,2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$	0,358
<b>CF-FB 0,5A FIN</b>	$-6 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-7}$	0,1106	$4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$	0,496

Интенсивность напряжения определяется по выражению:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{[(\sigma_\theta - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + \tau_{r\theta}^2]}.$$

Для случая одноосного сжатия в полярных координатах (учитывая допущение о не сжимаемости материала) интенсивности напряжений и деформации связаны следующими зависимостями [88, 210]:  $\sigma_i = |\sigma_r|$ ,  $\varepsilon_i = \frac{2}{3} |\varepsilon_r|$ ,  $\varepsilon_\theta = -\varepsilon_r$ ,

где  $\varepsilon_\theta$ ,  $\varepsilon_r$  – деформации по направлениям напряжений  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_r$ .

#### **Расчет напряжений при показателе деформационного упрочнения материала $n_d < 0,5$**

Пропуская промежуточные выводы, выполненные в работах [93, 94], запишем выражение для расчета радиальных напряжений при  $n_d < 0,5$ :  $\sigma_i = \sigma_r = -C_1 \frac{P_z}{r \cdot B} ch(C_3 \cdot \theta + C_2)$ , (3.62)

где  $C_2$  – коэффициент, определяемый из выражения:  $\frac{P_z}{P_y} = \frac{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} ch^{n_d}(C_3 \cdot \theta + C_2) \cdot \sin \theta \cdot d\theta}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} ch^{n_d}(C_3 \cdot \theta + C_2) \cdot \cos \theta \cdot d\theta}$ ; (3.63)

$C_1$  – коэффициент, определяемый из выражения:  $C_1 = \frac{1}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} ch^{n_d}(C_3 \cdot \theta + C_2) \cdot \sin \theta \cdot d\theta}$ ;

$C_3$  – коэффициент, определяемый из выражения:  $C_3 = \frac{\sqrt{1-2n_d}}{n_d}$ .

Коэффициент  $C_2$  в уравнении (3.63) определяется численным методом.

#### **Расчет напряжений при показателе деформационного упрочнения материала $n_d > 0,5$**

В соответствии с работами [93, 94], расчет радиальных напряжений при  $n_d > 0,5$  производится по выражениям:  $\sigma_i = \sigma_r = \frac{m_T}{r} [C_4 \cdot \cos(C_3 \cdot \theta + C_2)]^{n_d}$ , (3.64)

где  $C_4$  – коэффициент, определяемый по выражению:

$$C_4 = -\frac{2P_z}{\pi \cdot B \cdot f_{ш} \cdot m_T} \sqrt{1 + f_{ш}^2}, \text{ при } n_d=1 \quad (3.65)$$

где  $B$  – ширина обрабатываемой поверхности (см. рисунок 3.35);  $f_{ш} = \frac{P_z}{P_y}$ .

Коэффициент  $C_2$  определится из выражения:  $\frac{P_z}{P_y} = \frac{-\frac{\pi}{2} \sin C_2}{\frac{\pi}{2} \cos C_2} = tg C_2$ , (3.66)

где  $C_2 = -arctg \frac{P_z}{P_y}$  при  $n_d=1$  ( $n_d > 0,5$ ).

Декартовы компоненты напряжений определяются по известным полярным компонентам в соответствии с уравнениями связи:  $\sigma_y = \sigma_r \cdot \cos^2 \theta$ ,  $\sigma_z = \sigma_r \cdot \sin^2 \theta$ , (3.67)

Под действием силы резания в поверхностном слое возникают напряжения сжатия. Определенные по выражениям (3.62), (3.64) напряжения прямо пропорциональны составляющим силы резания, исследования которых рассмотрены в п. 3.2.

### 3.6.2 Температурные деформации и напряжения в поверхностном слое

Как уже было отмечено, связь интенсивностей напряжения и деформации при нагреве можно представить так же, как и от внешней силовой нагрузки [20, 88]:

$$\begin{aligned}\sigma_{it} &= E \cdot \varepsilon_{it}, \quad \text{при } \varepsilon_{it} < \varepsilon_T \\ \sigma_{it} &= m_T \cdot \varepsilon_{it}^{n_d}, \quad \text{при } \varepsilon_{it} \geq \varepsilon_T\end{aligned}\quad (3.68)$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\sigma_{it}$  и  $\varepsilon_{it}$  – интенсивности температурного напряжения и деформации,  $\varepsilon_T$  – деформация, соответствующая пределу текучести.

Зависимость  $\sigma_i = m_T \cdot \varepsilon_i^{n_d}$  выражает скалярные пластические свойства твердых тел [88, 98, 210], тесно связанные с физической природой материала и термодинамическими условиями процесса деформирования.

В случае, когда объемными упругими деформациями можно пренебречь и начальная температура  $\Theta_0=0$ , уравнение деформации принимает вид:  $\varepsilon = \alpha_0 \cdot \Theta$ , где  $\varepsilon$  – среднеарифметическое значение деформации,  $\alpha_0$  – коэффициент линейного расширения материала.

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 3\varepsilon = 3\alpha_0 \cdot \Theta.$$

Принимаем схему закрепленной детали, когда обрабатывается свободная поверхность. При обработке она не имеет возможности расширяться в направлениях  $Z$  и  $X$  (см. рисунок 3.35).

Для этой схемы закрепления:  $\varepsilon_x = \varepsilon_z = 0$ ,  $\varepsilon_y = 3\varepsilon = 3\alpha_0 \cdot \Theta$ .

Интенсивность деформации выражается через главные деформации в виде

$$\varepsilon_{it} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{2\varepsilon_y^2} = \frac{2}{3} |\varepsilon_y| = 2\alpha_0 \cdot \Theta. \quad (3.69)$$

Момент начала разгрузки в точке совпадает с моментом достижения максимальной температуры [88, 229].

Температура под источником определяется согласно п. 3.5.

Распределение температуры по оси  $Y$  можно рассчитать по выражению [93, 94, 263]:

$$\Theta_y = \Theta \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{y \cdot \sqrt{v}}{2\sqrt{\omega \cdot h}} \right) \right],$$

где  $\Theta$  – температура поверхности,  $\operatorname{erf} x$  – функция ошибок:  $\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ .

Тогда максимальная интенсивность температурной деформации равна:  $\varepsilon_{it} = 2\alpha_0 \cdot \Theta_y$ .

Интенсивность температурного напряжения определяется по выражениям (3.68).

Поскольку  $\sigma_y = 0$  и  $\varepsilon_x = \varepsilon_z = 0$ , получаем согласно [94]:  $\sigma_z = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} (-\varepsilon_y)$ . (3.70)

Если подставить в (3.70) уравнение (3.69), то получим  $\sigma_z = -\sigma_i$ .

Следовательно, при нагружении вплоть до момента начала разгрузки знаки у напряжений отрицательные, т.е. напряжения являются сжимающими.

### 3.6.3 Фиктивная сила от воздействия температуры

Установлено [93, 94], что тангенциальное напряжение  $\sigma_z$  при нагружении имеет один и тот же знак и от силового, и температурного факторов ( $\sigma_z < 0$ ). Это значит, что фиктивная сила от температуры  $P_t$  направлена в ту же сторону, что и сила резания  $P_z$ . В этом случае результирующая сила определяется как сумма силы резания и фиктивной силы от нагрева.

При полном охлаждении происходит сжатие по Y ( $\varepsilon_y < 0$ ), размеры обрабатываемой детали возвращаются к прежним, напряжения в плоскости XZ меняют знак на противоположный, т.е. появляются растягивающие напряжения  $\sigma_x = \sigma_z > 0$  [23, 88, 135, 229].

Фиктивная температурная сила вычисляется в упругом и упругопластическом состояниях по данным [93, 94]:

$$\left. \begin{aligned} P_t^e &= \frac{\pi \cdot r \cdot B \cdot \sigma_t^e}{2 \left( \frac{1}{f_{\text{III}}} \cos \theta + \sin \theta \right)}, & \text{при } \varepsilon_t < \varepsilon_T. \\ P_t &= \frac{\sigma_t \cdot r \cdot B}{C_1 \cdot ch^{n_d} (C_3 \cdot \theta + C_2)}, & \text{при } \varepsilon_t \geq \varepsilon_T. \end{aligned} \right\} \quad (3.71)$$

При расчете остаточных напряжений необходимо учитывать оба фактора: силовой и температурный. Для этой цели определяется суммарная фиктивная сила резания как сумма расчетной силы резания (см. п. 3.2) и фиктивной силы от температуры по (3.71) в зависимости от того, являются ли деформации термоупругими ( $\varepsilon_t < \varepsilon_T$ ) или нет  $\varepsilon_t \geq \varepsilon_T$ .

$$P_{z\Sigma}^e = P_{z \max} + P_t^e, \quad \text{при } \varepsilon_t < \varepsilon_T. \quad P_{z\Sigma} = P_{z \max} + P_t, \quad \text{при } \varepsilon_t \geq \varepsilon_T.$$

### 3.6.4 Суммарные остаточные напряжения от силового и температурного факторов

Суммарные декартовы компоненты напряжений от силы резания и температуры определяются по аналогии с (3.62) с учетом (3.67):

$$\sigma_{y\Sigma} = -C_1 \frac{P_{z\Sigma}}{r \cdot B} ch^{n_d} (C_2 \cdot \theta + C_3) \cos^2 \theta, \quad (3.72)$$

$$\sigma_{z\Sigma} = -C_1 \frac{P_{z\Sigma}}{r \cdot B} ch^{n_d} (C_2 \cdot \theta + C_3) \sin^2 \theta, \quad (3.73)$$

и для фиктивного упругого состояния – по аналогии с (3.64) и (3.65) с учетом (3.67):

$$\sigma_{y\Sigma}^e = -\frac{2}{\pi \cdot r \cdot B} \left( \frac{P_{z\Sigma}}{f_{\text{III}}} \cos \theta + P_{z\Sigma} \sin \theta \right) \cos^2 \theta, \quad (3.74)$$

$$\sigma_{z\Sigma}^e = -\frac{2}{\pi \cdot r \cdot B} \left( \frac{P_{z\Sigma}}{f_{\text{III}}} \cos \theta + P_{z\Sigma} \sin \theta \right) \sin^2 \theta. \quad (3.75)$$

Остаточные напряжения равны разности декартовых компонент напряжений по (3.72), (3.73) и напряжений фиктивного упругого состояния по (3.74) и (3.75):

$$\sigma_y^0 = \sigma_{y\Sigma} - \sigma_{y\Sigma}^e, \quad \sigma_z^0 = \sigma_{z\Sigma} - \sigma_{z\Sigma}^e.$$

Согласно разработанным теоретическим математическим моделям, произведен расчет остаточных напряжений по оси Z при варьировании режимных параметров обработки: скорости резания  $V$  и деформации круга  $\Delta Y$ . Результаты расчета  $\sigma_T^0$  приведены в таблицах 3.21 и 3.22. Экспериментальные остаточные напряжения (см. п. 3.6.5) по оси Z  $\sigma_Z^0$ , приведенные в этих таблицах, получены после статистической обработки экспериментальных данных с использова-

нием методики, описанной в п. 2.5. Доверительные границы отклонений экспериментальных данных от теоретически полученных определяются согласно п. 2.5 и составляют:  $\pm 4,78$  МПа при доверительной вероятности  $P=0,95$ .

**Таблица 3.21 – Результаты расчета остаточных напряжений по оси X для круга FS-WL 8A MED при  $S = 21$  мм/мин**

$V, \text{ м/с}$	$\Delta Y$ мм	$\sigma_{0,2},$ МПа (3.66)	$\alpha_0 \cdot 10^6$ (3.66)	$n_d$ (3.67)	$m_T,$ МПа (3.64)	Данные по п. 3.2		Данные по п. 3.5 $\Theta, ^\circ\text{C}$	Остаточные напряжения, МПа	
						$P_y, \text{ Н}$	$P_z, \text{ Н}$		$\sigma_T$	$\sigma_\varepsilon$
3,53	1,5	400	24,2	0,11	421,7	2,29	0,949	155,3	-68,7	-68
7,069		334,3	25,66	0,12	353,4	2,263	0,945	186,5	-79,2	-74
8,831		310,0	26,2	0,15	330,0	2,245	0,943	202,0	-80,28	-76
11,304		233,5	27,16	0,21	256,5	2,215	0,938	223,9	-80,77	-79
7,069	0,5	468,8	23,79	0,23	521,0	0,262	0,145	115,6	-56,3	-62
	1,0	400,0	24,0	0,16	430,5	1,013	0,445	151	-50,5	-50
	1,5	334,3	25,66	0,12	353,4	2,263	0,945	186,5	-29,2	-25
	2,0	239,6	27,8	0,11	252,2	4,014	1,646	222,0	-20,0	-20

**Таблица 3.22 – Результаты расчета остаточных напряжений по оси X для круга CF-FB 0,5A FIN при  $S = 21$  мм/мин**

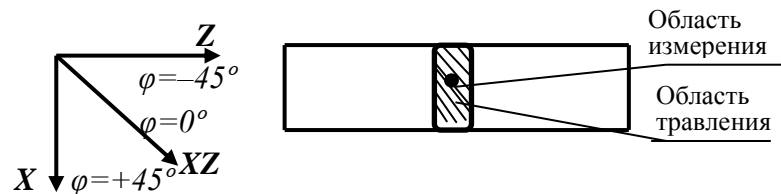
$V, \text{ м/с}$	$\Delta Y$ мм	$E,$ МПа (3.66)	$\alpha_0 \cdot 10^6$ (3.66)	$n_d$ (3.67)	$m_T \cdot 10^{-5}$ (3.65)	Данные по п. 3.2		Данные по п. 3.5 $\Theta, ^\circ\text{C}$	Остаточные напряжения, МПа	
						$P_y, \text{ Н}$	$P_z, \text{ Н}$		$\sigma_T$	$\sigma_\varepsilon$
5,053	4,5	69189	22,24	0,97	1,095	1,551	0,672	31,812	-251,3	-270
10,106		68416	22,46	1,04	1,083	1,677	0,887	43,04	-206,6	-210
12,632		68030	22,57	1,06	1,076	1,761	1,045	48,659	-190,9	-190
16,169		67490	22,73	1,07	1,068	1,902	1,322	56,521	-180,2	-180
10,106	3	68974	22,30	0,94	1,091	0,849	0,55	34,92	-275,7	-280
	3,5	68788	22,35	0,98	1,088	1,1	0,65	37,63	-251,9	-255
	4	68602	22,41	1,01	1,085	1,376	0,762	40,336	-228,1	-225
	4,5	68416	22,46	1,04	1,083	1,677	0,887	43,04	-206,6	-180

Как видно из таблиц 3.21 и 3.22, при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами в поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения, что положительно сказывается на эксплуатационных свойствах изделия.

### 3.6.5 Экспериментальное исследование остаточных напряжений

Исследования проведены на образцах из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2, основные характеристики которого при разных температурах приведены в таблице 3.18. Опытный образец (см. рисунок 2.13) крепился в приспособлении с боковых сторон и обрабатывался периферией кругов CF-FB 0,5A FIN (см. рисунок 2.7) и FS-WL 8A MED (см. рисунок 2.5) при различных режимах резания.

Определялось распределение остаточных напряжений по глубине образца со стороны обработанной плоскости. Напряжения определялись вдоль (по оси  $Z$ ,  $\varphi = -45^\circ$ ), поперек (по оси  $X$ ,  $\varphi = +45^\circ$ ) и промежуточное по оси  $XZ$  при  $\varphi = 0^\circ$  (рисунок 3.36). При этом измерены нормальные, касательные и главные напряжения во всех направлениях.



**Рисунок 3.36 – Схема исследования остаточных напряжений**

Исследования проводились на дифрактометре рентгеновском XSTRESS 3000 G3/G3R фирмы «Stresstech OY» (Финляндия) с рентгеновской трубкой TFS-3007-HP (рисунок 3.37) и универсальным программным обеспечением для управления оборудованием и обработки данных. Гониометр G3/G3R реализует фокусирующую геометрию Брега-Бретано и оснащен встроенным индикатором с круговой шкалой с ценой деления 0,001 мм для всех перемещений, что обеспечивает возможность автоматического измерения толщины удаленного материала, описание которого дано в [338].



**Рисунок 3.37 – Дифрактометр рентгеновский XSTRESS 3000 G3/G3R [338]**

Способ обсчета пиков – Cross correlation. Способ расчета касательных напряжений – Elliptical. Способ расчета главных напряжений – Regression from all rotations. Способ расчета тензора напряжений – Multiple regression from all data.

Измерения дифракции рентгеновских лучей, анализ и отчетность выполнялись в соответствии со стандартом EN 15305:2008. Non-destructive Testing. Test Method for Residual Stress analysis by X-ray Diffraction (Неразрушающий контроль. Метод определения остаточных напряжений с помощью дифракции рентгеновских лучей).

Образцы перед обработкой эластичными полимерно-абразивными кругами фрезеровались 4-х зубой фрезой при  $n=1600$  об/мин,  $S=130$  мм/мин, глубине резания 0,5 мм. Состояние остаточных напряжений образцов до обработки эластичными полимерно-абразивными кругами приведено в таблице 3.23, из которой видно, что все нормальные остаточные напряжения являются растягивающими.

По результатам исследования образцов обработанных эластичными полимерно-абразивными кругами, построены эпюры распределения остаточных напряжений по глубине залегания  $t$  в поверхностном слое.



**Таблица 3.23 – Остаточные напряжения в образцах до обработки эластичными полимерно-абразивными кругами**

Метод обработки образца	$\sigma_z^0$ , МПа вдоль $\varphi = -45^\circ$	$\sigma_x^0$ , МПа поперек $\varphi = +45^\circ$	$\tau_{z,0}^0$ , МПа вдоль $\varphi = -45^\circ$	Главные напряжения	
				$\sigma_1$ , МПа	$\sigma_2$ , МПа
Цилиндрическое фрезерование	+31,1	+154,9	-76,7	+155,2	+30,8
Торцевое фрезерование	+48,9	+41,0	-63,4	+61,3	+28,6

В качестве примера на рисунке 3.38 приведены эпюры остаточных напряжений после обработки кругом FS-WL- 8A MED, а на рисунке 3.39 – после обработки кругом CF-FB-0,5A FIN, по которым видно, что все нормальные остаточные напряжения на поверхности образца являются сжимающими и уменьшающимися (по модулю) по глубине залегания.

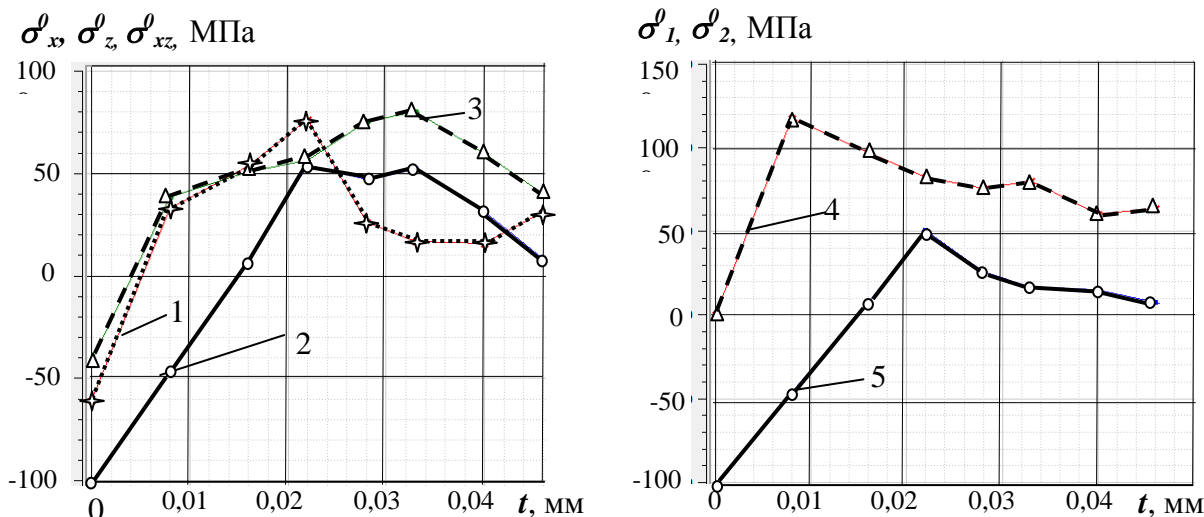
Результаты измерения остаточных напряжений приведены в таблицах 3.24 и 3.25.

**Таблица 3.24 – Результаты экспериментального определения остаточных напряжений после обработки кругом FS-WL 8A MED при  $S = 21$  мм/мин**

V, м/с	$\Delta Y$ , мм	$\sigma_z^0$ , МПа вдоль $\varphi = -45^\circ$	$\sigma_x^0$ , МПа поперек $\varphi = +45^\circ$	$\tau_{z,0}^0$ , МПа вдоль $\varphi = -45^\circ$	Главные напряжения	
					$\sigma_1$ , МПа	$\sigma_2$ , МПа
3,53	1,5	-29,7	+41,5	-78,3	+43,9	-31,8
7,069		-23,1	+41,4	-71,8	+41,5	-23,2
8,831		-43,1	+34,7	-73,2	+37,4	-45,7
11,304		-	-	-	-	-
7,069	0,5	-49,9	-14,5	-52,8	+0,3	-64,7
	1,0	-60,7	-41,8	-75,5	0	-102,5
	1,5	-23,1	+41,4	-71,8	+41,5	-23,2
	2,0	-19,4	+43,2	-77,2	+67,2	-43,5

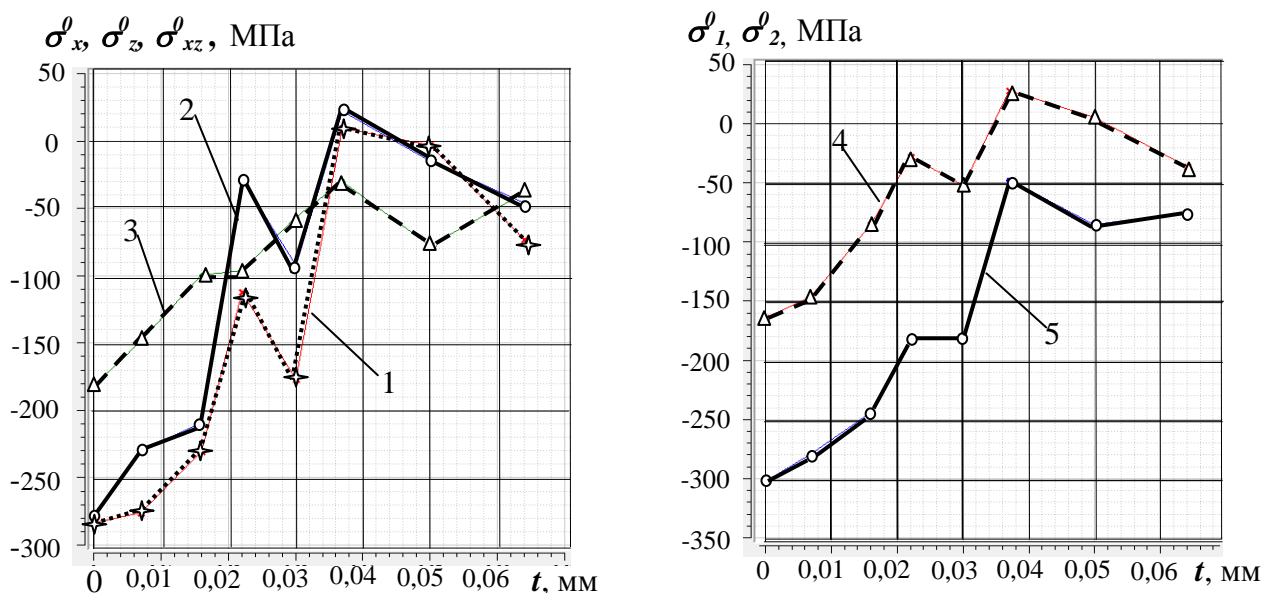
**Таблица 3.25 – Результаты экспериментального определения остаточных напряжений после обработки кругом CF-FB 0,5A FIN при  $S = 21$  мм/мин**

V, м/с	$\Delta Y$ , мм	$\sigma_z^0$ , МПа вдоль $\varphi = -45^\circ$	$\sigma_x^0$ , МПа поперек $\varphi = +45^\circ$	$\tau_{z,0}^0$ , МПа вдоль $\varphi = -45^\circ$	Главные напряжения	
					$\sigma_1$ , МПа	$\sigma_2$ , МПа
5,053	4,5	-264	-51,4	-71,4	-36,9	-278,5
10,106		-183,9	-200,9	-69,9	-151,9	-232,9
12,632		-217,7	-178,8	-55,3	-143,2	-253,3
16,169		-204,1	-116,5	-65,6	-99,3	-221,3
10,106	3	-283,8	-182,4	-65,8	-163,9	-302,3
	3,5	-240,8	-87,9	-97,2	-70,2	-258,4
	4,0	-241,9	-107,7	-73,8	-87,1	-262,5
	4,5	-183,9	-200,9	-69,9	-151,9	-232,9



1 –  $\sigma_z^0$  при  $\varphi = -45^\circ$ ; 2 –  $\sigma_{xz}^0$  при  $\varphi = 0$ ; 3 –  $\sigma_x^0$  при  $\varphi = +45^\circ$ ; 4 – max главные напряжения  $\sigma_1^0$ ; 5 – min главные напряжения  $\sigma_2^0$ .

**Рисунок 3.38 – Эпюры распределения остаточных напряжений по глубине залегания после обработки кругом FS-WL- 8A MED при  $V= 11,77$  м/с,  $\Delta Y=1$  мм,  $S=21$  мм/мин**



1 –  $\sigma_z^0$  при  $\varphi = -45^\circ$ ; 2 –  $\sigma_{xz}^0$  при  $\varphi = 0$ ; 3 –  $\sigma_x^0$  при  $\varphi +45^\circ$ ; 4 – max главные напряжения  $\sigma_1^0$ ; 5 – min главные напряжения  $\sigma_2^0$ .

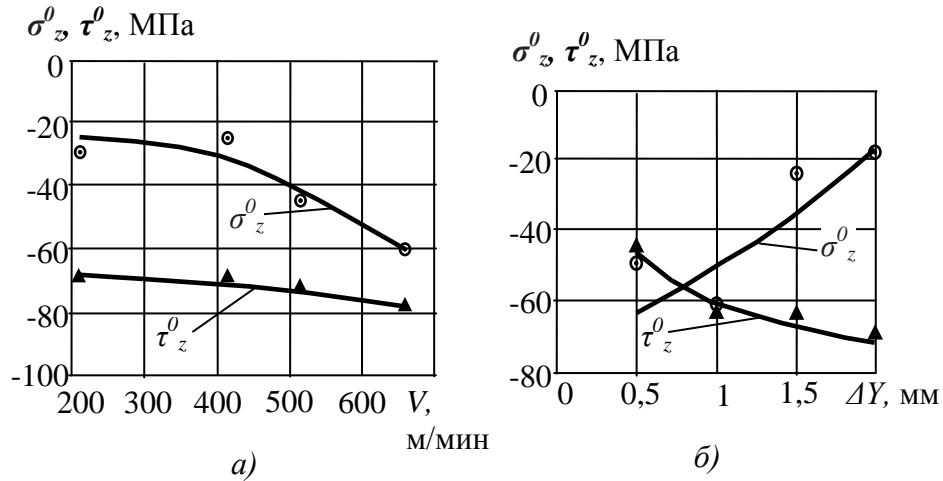
**Рисунок 3.39 – Эпюры распределения остаточных напряжений по глубине залегания после обработки кругом CF-FB 0,5A FIN при  $V= 16,755$  м/с,  $\Delta Y=3$  мм,  $S=21$  мм/мин**

В качестве примера на рисунке 3.38 приведены эпюры остаточных напряжений после обработки кругом FS-WL- 8A MED, а на рисунке 3.39 – после обработки кругом CF-FB-0,5A FIN, по которым видно, что все нормальные остаточные напряжения на поверхности образца являются сжимающими и уменьшающимися (по модулю) по глубине залегания.

Результаты измерения остаточных напряжений приведены в таблицах 3.24 и 3.25.

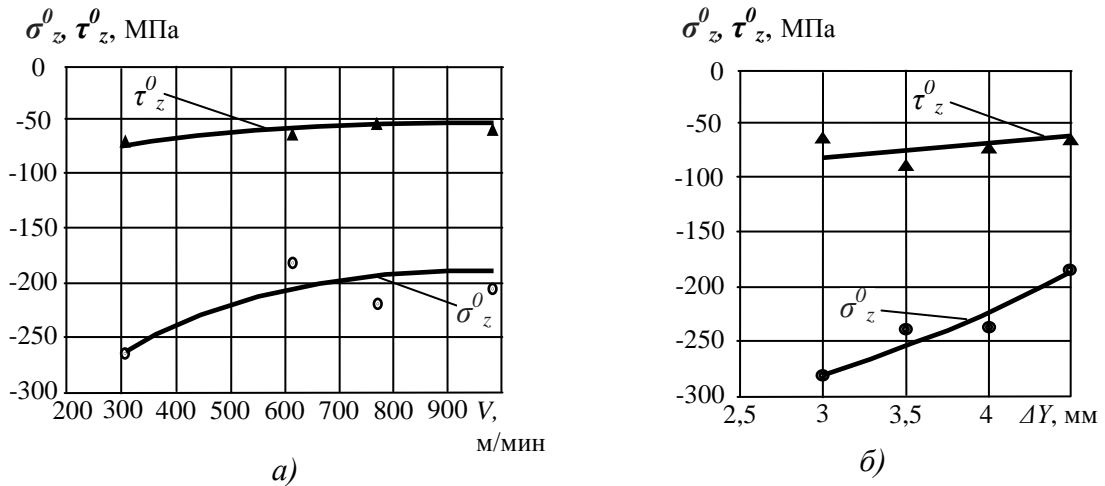
На рисунках 3.40 и 3.41 приведены зависимости нормальных и касательных остаточных напряжений от скорости резания  $V$  и деформации круга  $\Delta Y$ . Линиями показаны зависимости, полученные в результате теоретического расчета, точками – экспериментальные данные.

Анализ касательных напряжений показал, что данные напряжения всегда сжимающие и практически не изменяются по глубине залегания и не меняются в зависимости от параметров обработки (скорости резания и деформации круга), До обработки эластичными полимерно-абразивными кругами касательные напряжения были в пределах 65 – 70 МПа, после обработки эластичным полимерно-абразивным кругом зафиксировано их колебание от 55 до 78 МПа. Поэтому вопрос о касательных напряжениях в дальнейшем обсуждаться не будет.



$\tau_z^0$  – касательные остаточные напряжения,  $\sigma_z^0$  – нормальные остаточные напряжения вдоль образца.

**Рисунок 3.40 – Зависимости наименьших остаточных напряжений для круга FS-WL 8A MED на глубине 0 – 0,03 мм при  $S = 21$  мм/мин: а – от скорости резания  $V$  при  $\Delta Y = 1,5$  мм; б – от деформации круга  $\Delta Y$  при  $V = 424,11$  м/мин**



$\tau_z^0$  – касательные остаточные напряжения,  $\sigma_z^0$  – нормальные остаточные напряжения вдоль образца.

**Рисунок 3.41 – Зависимости наименьших остаточных напряжений для круга CF-FB 0,5A FIN на глубине 0 – 0,03 мм при  $S = 21$  мм/мин: а – от скорости резания  $V$  при  $\Delta Y = 4,5$  мм; б – от деформации круга  $\Delta Y$  при  $V = 612,6$  м/мин**

При обработке кругом FS-WL-8A MED остаточные напряжения вдоль образца ( $\sigma_z^0$  при  $\varphi = -45^\circ$ ) и min главные напряжения  $\sigma_2^0$ , оказались сжимающими, а поперек образца ( $\sigma_x^0$  при  $\varphi = +45^\circ$ ) и max главные напряжения  $\sigma_1^0$  при некоторых режимах – растягивающими. Это видно по результатам, приведенным в таблице 3.24.

В процессе обработки кругом FS-WL-8A MED на формирование остаточных напряжений существенное влияние оказал температурный фактор, поскольку в зоне резания действовали значительные температуры  $\Theta$ , что и послужило причиной появления малых сжимающих и растягивающих остаточных напряжений.

В результате обработки кругом CF-FB-0,5A FIN в поверхностном слое сформированы сжимающие нормальные остаточные напряжения. Это видно по данным наибольших (по модулю) остаточных напряжений на поверхности образца, приведенным в таблице 3.25. При обработке кругом CF-FB-0,5A FIN температура в зоне резания  $\Theta$  мала и существенного влияния на остаточные напряжения оказать не могла. Следовательно, главным фактором является нормальная составляющая сила  $P_y$ , под действием которой формируются сжимающие остаточные напряжения. Как известно [53, 143 и др.], сжимающие остаточные напряжения положительно влияют на эксплуатационные свойства изделий.

В целом следует отметить, что при обработке исследуемыми эластичными полимерно-абразивными кругами образцов, полученных цилиндрическим и торцевым фрезерованием (см. таблицу 3.23), остаточные напряжения оказываются полностью переформированы. Учитывая, что данный процесс обработки происходит на очень тонком разупрочненном поверхностном слое, установлено, что в обрабатываемом материале возникают сжимающие остаточные напряжения на малой глубине залегания.

### **3.7 Анализ состояния поверхностного слоя деталей после обработки эластичными полимерно-абразивными кругами**

При обработке образцов из сплава В95пчТ2 эластичными полимерно-абразивными кругами с повышенными режимами обработки, на обработанной поверхности появляется незначительное потемнение. Необходимо установить, может ли данное явление повлиять на эксплуатационные свойства изделий. Первоначально предполагалось, что на поверхности образца остаются частицы полимерной связки в результате взаимодействия инструмента с материалом образца.

Для установления истинной причины такого явления были проведены исследования поверхностного слоя на электронном микроскопе Jeol JIB-Z4500 (рисунок 3.43) с детектором Oxford X-тач и программой INCA Point ID, а также на металлографическом микроскопе Микромед МЕТ-2 (рисунок 3.42). Описание данных приборов приведено в п. А.5 приложения А.

Из приведенных снимков поверхностей на микроскопе Микромед МЕТ-2: до обработки (рисунок 3.44, б), после обработки (рисунок 3.44, з) и после обработки и травления (рисунок 3.44, е) по технологии, применяемой при анодировании всех деталей из алюминиевых сплавов в авиационной промышленности (травление в 20%-ном водном растворе NaOH и последующем

осветлении в 20%-ном водном растворе  $\text{HNO}_3$ ), видно, что обработанные и не протравленные образцы имеют признаки потемнения. После травления по технологии анодирования потемнение полностью исчезает.

Исследования, проведенные на электронном микроскопе Jeol JIB-Z4500, показали, что в поверхностном слое присутствуют следующие химические элементы: углерод, кислород, магний, алюминий, кремний, марганец, медь и цинк. Это хорошо видно на диаграмме спектрального анализа (рисунок 3.45).



**Рисунок 3.42 – Металлографический микроскоп Микромед МЕТ-2 [141]**



**Рисунок 3.43 – Растровый электронный микроскоп JIB-Z4500 Multibeam [245]**

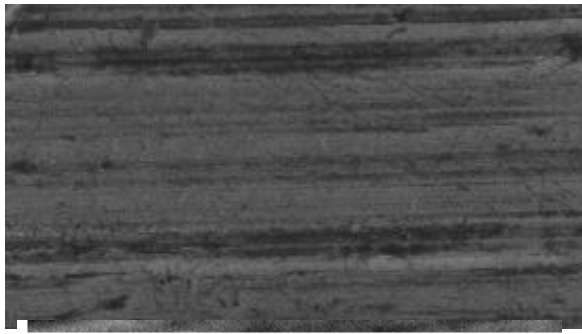
Если проанализировать данные, полученные при помощи электронной микроскопии и приведенные в таблице 3.26, то можно сделать вывод о том, что потемнение связано с окислением алюминия при интенсивном взаимодействии инструмента с поверхностным слоем (химическое соединение с участием кислорода, алюминия и других элементов). Электронное изображение во вторичных электронах по кислороду составляет 14,71%, а в отраженных электронах – 19,44%, в необработанном образце кислорода содержится 1,53% и 2,60% соответственно. После травления содержание кислорода становится практически таким же как и у необработанного образца.

**Таблица 3.26 – Химический состав поверхностного слоя**

(все результаты средние в весовых %)

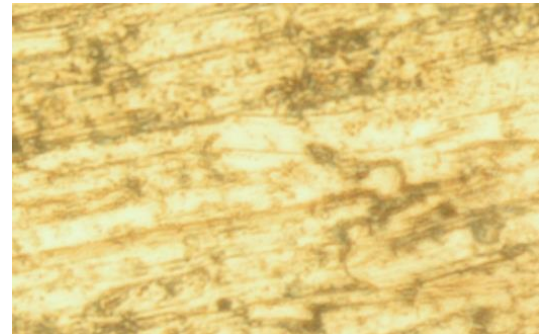
Образец	Электронное изображение в электронах:	C	O	Mg	Al	Si	Mn	Cu	Zn
Фрезерован, не протравлен	вторичных	33,65	1,53	0,63	61,44	0,25	–	0,25	2,25
	отраженных	5,43	2,60	0,79	84,75	0,25	–	0,28	2,68
Обработан, не протравлен	вторичных	10,15	14,71	2,00	67,17	0,33	0,30	1,02	4,10
	отраженных	6,72	19,44	1,83	63,11	0,32	0,28	0,85	3,70
Обработан, протравлен	вторичных	19,68	2,13	1,80	70,46		0,41	1,07	4,46
	отраженных	8,74	1,16	2,01	81,60		0,31	1,26	4,92

Образец отфрезерован. Травлению не подвергался.



70мкм

*a)*

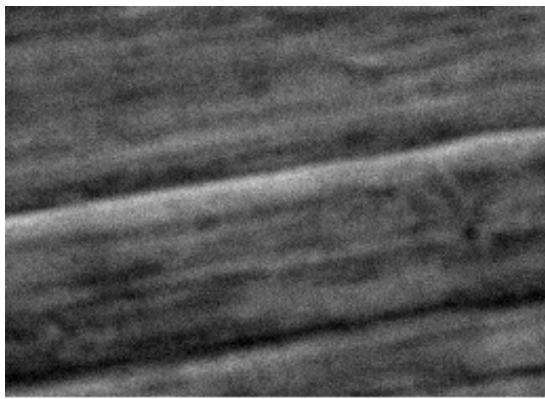


Увеличение 1000х

*б)*

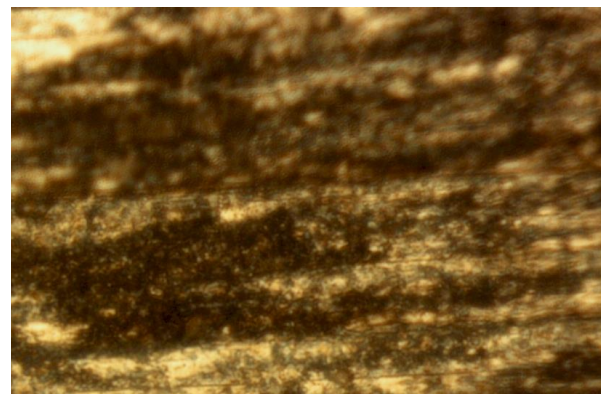
---

Образец обработан кругом DB-WL 8SMED.  $V=479,09$  м/мин,  $\Delta Y=2$  мм,  $S=130$  мм/мин.  
Травлению не подвергался.



70мкм

*в)*



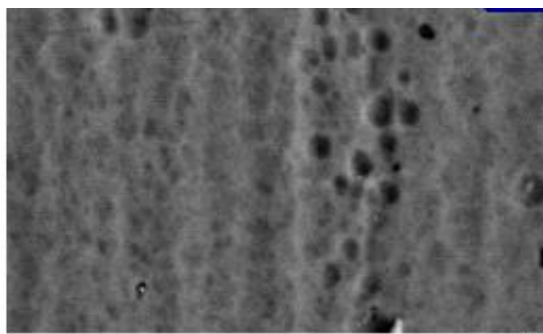
Увеличение 1000х

*г)*

---

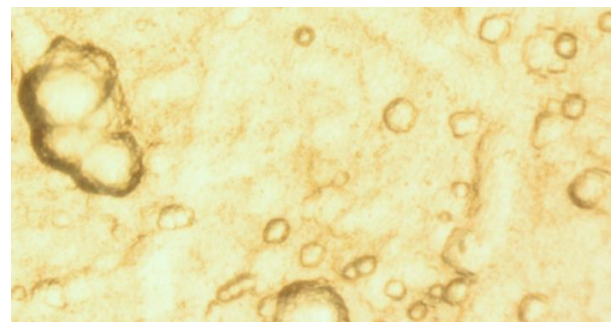
Образец обработан кругом FS-WL-8AMED.  $V=461,81$  м/мин,  $\Delta Y=1,5$  мм,  $S=130$  мм/мин.  
Подвергался травлению: NaOH – 20%, HNO<sub>3</sub> – 20%.

С



70мкм

*д)*

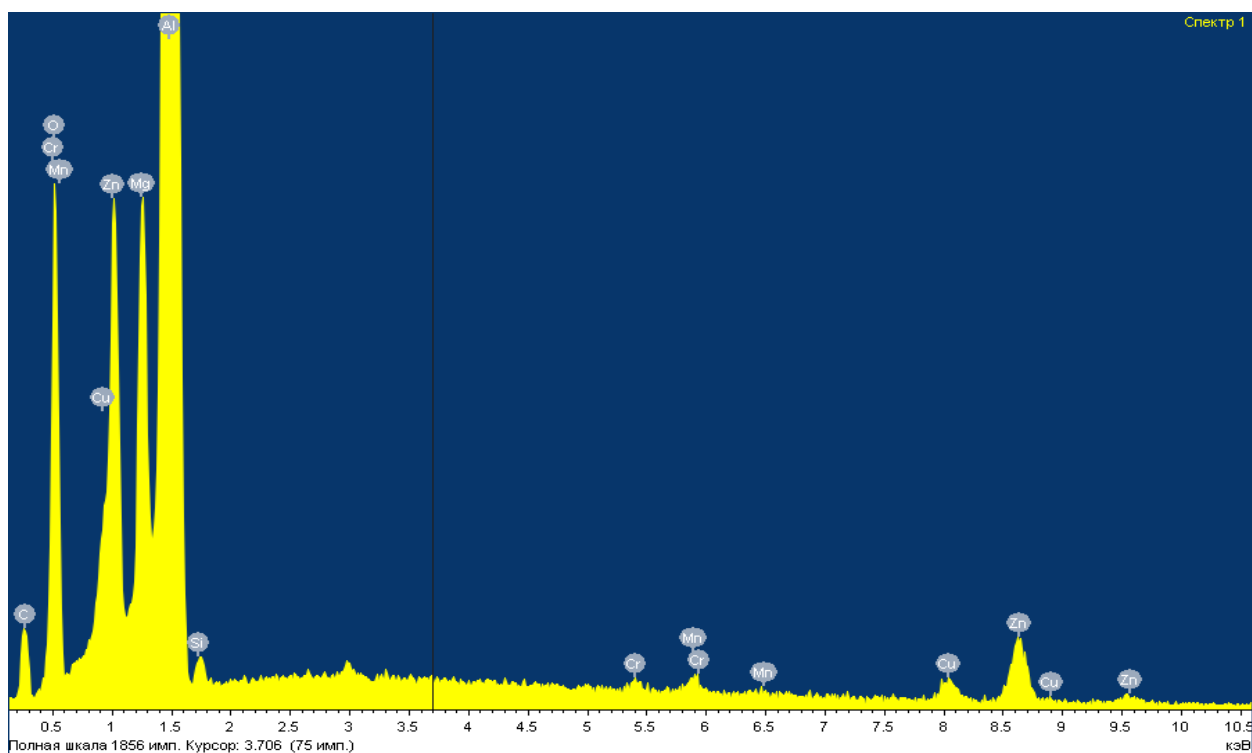


Увеличение 1000х

*е)*

Рисунок 3.44 – Снимки поверхностей образцов, полученные на электронном (*a, в, д*) и на металлографическом (*б, г, е*) микроскопах





**Рисунок 3.45 – Диаграмма спектрального анализа поверхностного слоя**

На основании данных исследований следует сделать вывод о том, что случаи потемнения обрабатываемой детали из алюминиевого сплава не могут препятствовать внедрению зачистки поверхностей полимерно-абразивными инструментами в авиационной промышленности, поскольку все присутствующие на поверхности частицы легко удаляются при подготовке к анодированию.

### 3.8 Износостойкость инструмента

#### 3.8.1 Экспериментальное исследование износа эластичных полимерно-абразивных кругов

Исследования проводились на универсально-фрезерном станке (см. рисунок 2.17) на образцах из алюминиевого сплава В95пчТ2 (см. рисунок 2.13). Износ круга определялся его взвешиванием до и после обработки на электронных весах (см. рисунок 2.21). В качестве показателя износа круга использована величина износа  $I$  (мм/мин) за единицу времени.

$$\text{Величина } I \text{ рассчитывалась по формуле: } I = \frac{G_1 - G_2}{\gamma_k \cdot \pi \cdot D_k \cdot B \cdot T},$$

где  $\gamma_k$  – плотность материала круга в г/мм<sup>3</sup> (см. таблицу 3.1);  $G_1$  и  $G_2$  – масса круга до и после обработки соответственно, в г;  $B$  – ширина обрабатываемого образца, в мм;  $D_k$  – диаметр круга, в мм (см. таблицу 3.1);  $T$  – время обработки длины образца  $l$ , в мин.

Заключение о значимости или незначимости влияния рассматриваемого фактора  $\Delta Y$ ,  $V$  и  $S$  на износ инструмента  $I$  получено с использованием критерия Фишера (см. п. 2.5.2).  $F_{0,95}$  –

критерий Фишера при доверительной вероятности 0,95. Этот критерий при степенях свободы  $f_1 = k - 1 = 3$  и  $f_2 = k(n - 1) = 8$  по справочным данным [199] равен  $F_{0,95} = 4,1$ .

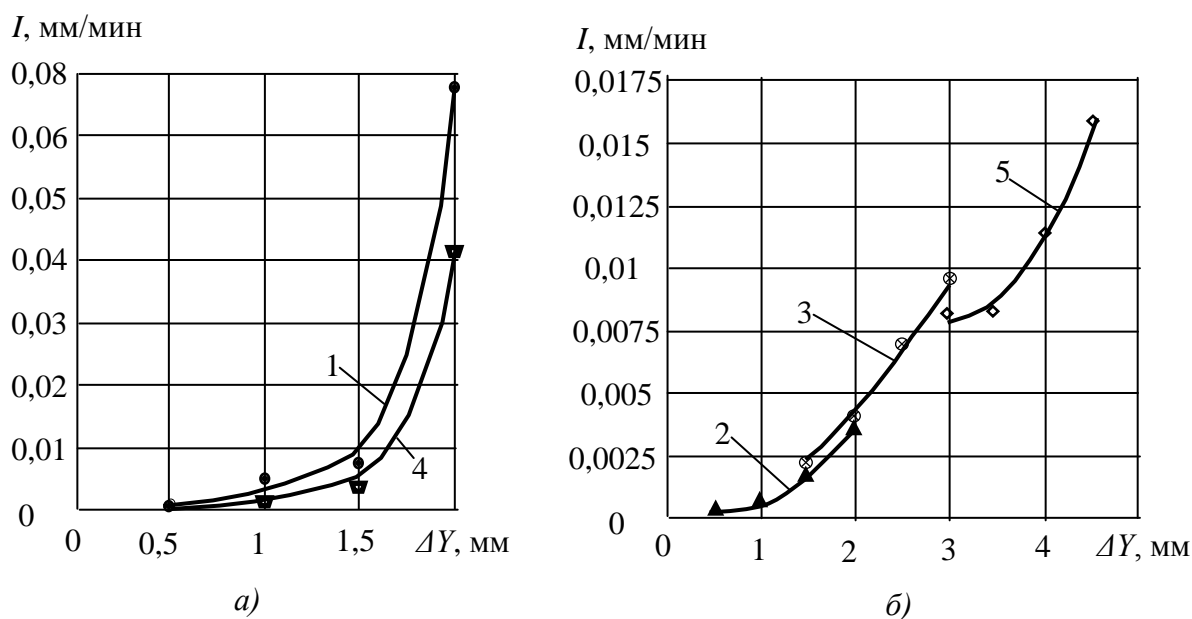
Доверительные границы определены как  $\pm S_0 \cdot t$ , где  $t$  – квантиль Стьюдента. При количестве степеней свободы 11:  $t = 2,20$ .

В таблице 3.27 приведены результаты дисперсионного анализа зависимостей при доверительной вероятности 0,95:

**Таблица 3.27 – Результаты дисперсионного анализа зависимостей величины износа  $I$  от скорости резания  $V$  и деформации инструмента  $\Delta Y$**

Марка круга	Функция	$S_A^2$ , (мм/мин) <sup>2</sup>	$S_0^2$ , (мм/мин) <sup>2</sup>	$F=S_A^2/S_0^2$	Значимость влияния фактора	Доверительные границы $S_0 \cdot t$ , мм/мин
FS-WL 8AMED	$I = f(\Delta Y)$	$3,55 \cdot 10^{-3}$	$2,98 \cdot 10^{-6}$	1192,233	значимо	$\pm 3,8 \cdot 10^{-3}$
	$I = f(V)$	$1,89 \cdot 10^{-3}$	$2,31 \cdot 10^{-6}$	819,159	значимо	$\pm 3,35 \cdot 10^{-3}$
FS-WL 6SFIN	$I = f(\Delta Y)$	$4,73 \cdot 10^{-6}$	$7,09 \cdot 10^{-8}$	66,783	значимо	$\pm 5,86 \cdot 10^{-4}$
	$I = f(V)$	$3,78 \cdot 10^{-6}$	$3,26 \cdot 10^{-9}$	1161,046	значимо	$\pm 1,26 \cdot 10^{-4}$
FS-WL 2SCRS	$I = f(\Delta Y)$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$1,58 \cdot 10^{-8}$	1957,947	значимо	$\pm 2,77 \cdot 10^{-4}$
	$I = f(V)$	$1,49 \cdot 10^{-6}$	$1,69 \cdot 10^{-9}$	883,58	значимо	$\pm 9,05 \cdot 10^{-5}$
DB-WL 8SMED	$I = f(\Delta Y)$	$1,103 \cdot 10^{-3}$	$6,56 \cdot 10^{-8}$	16803	значимо	$\pm 5,64 \cdot 10^{-4}$
	$I = f(V)$	$4,03 \cdot 10^{-4}$	$3,57 \cdot 10^{-7}$	1129,99	значимо	$\pm 1,314 \cdot 10^{-3}$
CF-FB 0,5AFIN	$I = f(\Delta Y)$	$3,98 \cdot 10^{-5}$	$9,75 \cdot 10^{-8}$	408,03	значимо	$\pm 6,87 \cdot 10^{-4}$
	$I = f(V)$	$1,208 \cdot 10^{-3}$	$5,18 \cdot 10^{-7}$	2330,175	значимо	$\pm 1,584 \cdot 10^{-3}$

На рисунке 3.46, а, б приведены зависимости износа кругов за 1 мин работы от деформации кругов.



1 – FS-WL 8A MED при  $V = 441,4$  м/мин; 2 – FS-WL 6S FIN при  $V = 406,8$  м/мин;  
3 – FS-WL 2S CRS при  $V = 462,4$  м/мин; 4 – DB-WL 8S MED при  $V = 464,3$  м/мин;  
5 – CF-FB 0,5A FIN при  $V = 606,3$  м/мин.

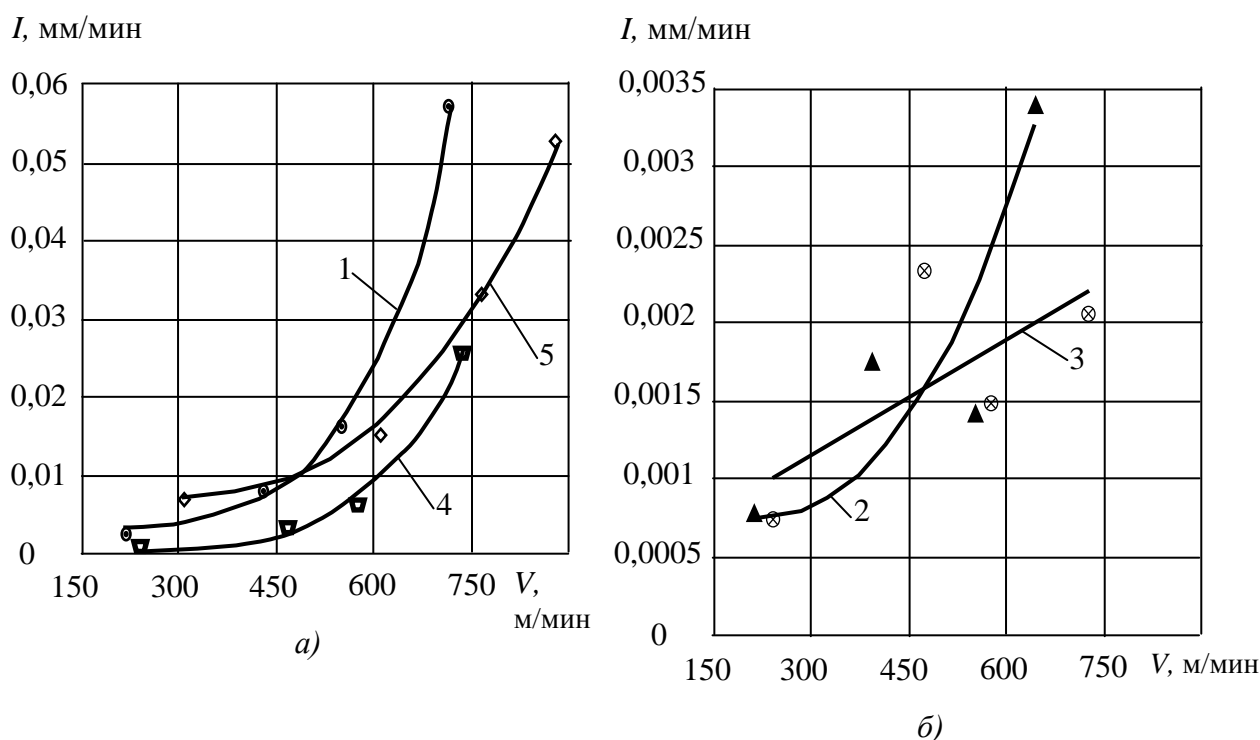
**Рисунок 3.46 – Зависимость износа за 1 мин работы от деформации  $\Delta Y$  для кругов**



Установлено, что износ инструмента с увеличением деформации растет. Это объясняется тем, что с увеличением деформации растет вертикальная составляющая силы резания, а, следовательно, растет и сила трения.

На рисунке 3.47, а, б приведены зависимости износа кругов за 1 мин работы от скорости резания. Установлено, что износ инструментов с увеличением скорости растет.

Это объясняется тем, что с увеличением скорости растут центробежная и динамическая составляющие силы взаимодействия абразивного зерна по обрабатываемой поверхности. В момент встречи абразивных зерен круга с обрабатываемой поверхностью происходит удар, в результате которого сила становится существенно больше статической [41]. При этом центробежная сила и ударный импульс напрямую зависят от скорости.



1 – FS-WL 8A MED; 2 – FS-WL 6S FIN; 3 – FS-WL 2S CRS; 4 – DB-WL 8S MED при деформации  $\Delta Y = 1,5$  мм; 5 – CF-FB 0,5A FIN при деформации  $\Delta Y = 4,5$  мм.

**Рисунок 3.47 – Зависимость износа инструмента за 1 мин работы от скорости резания  $V$  для кругов**

Полученные экспериментальные зависимости были аппроксимированы и проверены на надежность и адекватность согласно методике, изложенной в п. 2.5. В результате получено следующее регрессионное уравнение:

$$I = a_1 \cdot V^2 + a_2 \cdot \Delta Y^2 + a_3 \cdot V + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot V \cdot \Delta Y + a_6, \quad (3.76)$$

где  $V$  – скорость резания, м/мин;  $\Delta Y$  – деформация круга, мм.

Значения коэффициентов  $a_{1-5}$  и свободного члена  $a_6$  данного уравнения для каждого из исследованных инструментов приведены в таблице 3.28.

Таблица 3.28 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (3.76)

Коэффициент	FS-WL 8A MED	FS-WL 6S FIN	FS-WL 2S CRS	DB-WL 8S MED	CF-FB 0,5A FIN
$a_1$	$6,3929 \cdot 10^{-8}$	$-8,34 \cdot 10^{-10}$	$-5,894 \cdot 10^{-9}$	$8,869 \cdot 10^{-9}$	$2,6883 \cdot 10^{-8}$
$a_2$	$-4,16136 \cdot 10^{-4}$	$4,2595 \cdot 10^{-4}$	$1,3418328 \cdot 10^{-3}$	$-5,78041 \cdot 10^{-7}$	$1,089303 \cdot 10^{-3}$
$a_3$	$-6,2725 \cdot 10^{-6}$	$2,62655 \cdot 10^{-6}$	$-1,65935 \cdot 10^{-6}$	$-9,2 \cdot 10^{-10}$	$-3 \cdot 10^{-5}$
$a_4$	$9,07143 \cdot 10^{-3}$	$-1,133675 \cdot 10^{-4}$	$-4,264372 \cdot 10^{-3}$	$8,843099 \cdot 10^{-3}$	$-6,745733 \cdot 10^{-3}$
$a_5$	$6,95575 \cdot 10^{-6}$	$9,94751 \cdot 10^{-7}$	$6,987568 \cdot 10^{-6}$	$1,183662 \cdot 10^{-6}$	$7,964633 \cdot 10^{-6}$
$a_6$	$-6,91871 \cdot 10^{-3}$	$-6,408575 \cdot 10^{-4}$	$3,15588 \cdot 10^{-3}$	$-1,668018 \cdot 10^{-3}$	0,01203567

Как следует из результатов исследования, зависимости износа инструмента от режимов резания ( $\Delta Y$ ,  $V$ ) аналогичны зависимостям сил и температуры от тех же параметров.

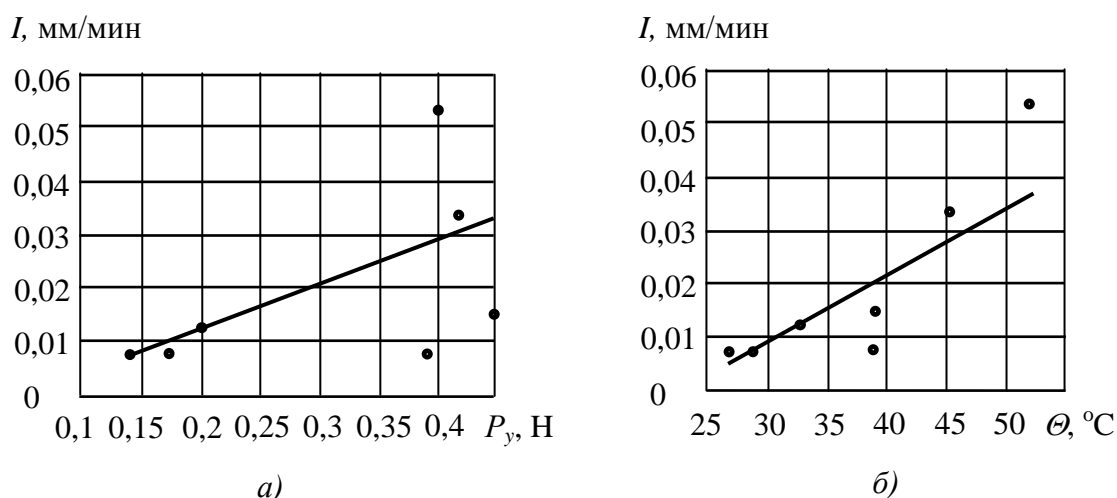


Рисунок 3.48 – Зависимость износа инструмента от нормальной составляющей силы резания  $P_y$  (а) и температуры в зоне резания (б) для круга CF-FB 0,5A FIN

Установлены зависимости износа инструмента от нормальной составляющей силы  $P_y$  и температуры в зоне резания  $\Theta$ .

В качестве примера такие зависимости приведены на рисунке 3.48, а и рисунке 3.48, б соответственно для круга CF-FB 0,5A FIN.

Установлено, что зависимость износа инструмента за 1 мин времени работы от силы  $P_y$  подчиняется линейному закону и выражается уравнением:  $I = a \cdot P_y + b$ , (3.77) где  $a$  – коэффициент и  $b$  – свободный член для разных кругов, которые приведены в таблице 3.29.

Таблица 3.29 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (3.77)

Марка круга	FS-WL 8A MED	FS-WL 6S FIN	FS-WL 2S CRS	DB-WL 8S MED	CF-FB 0,5A FIN
Коэффициент $a$	0,0039	0,0004	0,001	0,0034	0,0041
Свободный член $b$	0,008	-0,0002	0	-0,0023	0,0031

Зависимость износа инструмента за 1 мин времени работы от температуры  $\Theta$  выражается уравнением:  $I = c \cdot \Theta^o$ , (3.78)

где  $c$  – коэффициент, приведенный в таблице 3.30 для исследованных кругов.

**Таблица 3.30 – Значения коэффициентов в уравнении (3.78)**

Марка круга	FS-WL 8A MED	FS-WL 6S FIN	FS-WL 2S CRS	DB-WL 8S MED	CF-FB 0,5A FIN
Коэффициент $c$	0,0071	0,0005	0,001	0,0032	0,0052

Таким образом, из результатов исследования можно констатировать, что по известной величине нормальной составляющей силы резания  $P_y$  или по известному значению температуры в зоне обработки  $\Theta$  можно прогнозировать износ инструмента.

Следует отметить, что в связи с износом инструмента деформация круга  $\Delta Y$  постепенно уменьшается, вследствие чего интенсивность съема материала падает. Поэтому при длительном процессе обработки необходимо периодически корректировать натяг инструмента на величину изношенной части  $l_{изн}$ .

$$l_{изн} = I \cdot T_{изн},$$

где  $T_{изн}$  – время обработки, в течение которого наступает износ  $l_{изн}$ , мин:  $T_{изн} = \frac{l_{изн}}{I}$ .

$I$  – интенсивность износа, которая вычисляется по формуле (3.96), мм/мин.

Для исследованных кругов время  $T_{изн}$  (при заданных допустимых значений  $l_{изн}$ ) в качестве примера приведено в таблице 3.31 для наименьшей  $I_{min}$  (мм/мин) и наибольшей  $I_{max}$  (мм/мин) возможной интенсивности износа.

**Таблица 3.31 – Расчетное время работы круга до корректировки натяга инструмента  $\Delta Y$**

Марка круга	Износ $I$ по (3.76)		Износ $l_{изн}$ , мм				
	$I_{min}$ , мм/мин	$I_{max}$ , мм/мин	0,20	0,35	0,5	0,75	1,0
	Время обработки $T_{изн}$ , мин						
FS-WL 8A MED	0,002		100	175	250	375	500
		0,078	2,6	4,5	6,4	9,6	12,8
FS-WL 6S FIN	0,0005		400	700	1000	1500	2000
		0,0037	54,1	94,6	135,1	202,7	270,3
DB-WL 8S MED	0,002		100	175	250	375	500
		0,041	4,9	8,5	12,2	18	24,4
FS-WL 2S CRS	0,002		100	175	250	375	500
		0,01	20	35	50	75	100
CF-FB 0,5A FIN	0,0076		26,3	46,1	65,8	98,7	131,6
		0,016	12,5	21,9	31,2	46,9	62,5

Полученную в результате экспериментальных исследований математическую модель износа инструмента при зачистке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами, которая является подсистемой четвертого уровня в рамках разрабатываемой системы управления, следует считать устойчивой в связи с тем, что воздействие возмущающих факторов (входных параметров) корректируется системой управления (см. п. 2.1.2).

### Результаты и выводы по главе 3

1. Математическое моделирование процесса по силам взаимодействия эластичных полимерно-абразивных кругов с обрабатываемой поверхностью, производительности процесса обработки, температуре в зоне обработки и показателям качества поверхностного слоя, является реализацией системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки в пространстве состояний и позволяет осуществить развитие научных основ абразивной обработки с помощью эластичных полимерно-абразивных кругов.
2. Математическая модель силового взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью является основой при математическом моделировании процесса съема материала (производительности обработки), формирования шероховатости, температуры в зоне резания, остаточных напряжений.
3. Разработанная математическая модель для расчета съема материала с поверхности детали (производительности процесса обработки), основанная на теоретических положениях взаимодействия режущего микрорельефа эластичных полимерно-абразивных кругов с обрабатываемой поверхностью, позволяет аналитически определять производительность процесса обработки по известным параметрам инструмента в зависимости от режимных параметров обработки.
4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований силы резания являются основой для решения проблемы определения целевой функции расхода электроэнергии при оптимизации процесса, а также требуемой мощности при выборе оборудования для финишной обработки деталей полимерно-абразивными инструментами.
5. Созданная на основе результатов теоретических исследований математическая модель температуры, возникающей в зоне обработки, позволяет регламентировать режимы обработки с учетом температуры плавления полимерной связки круга. Адекватность данной математической модели подтверждена экспериментальными исследованиями.
6. Разработанная математическая модель формирования микрогеометрии поверхности детали, основанная на взаимодействии режущего микрорельефа эластичных полимерно-абразивных кругов с обрабатываемой поверхностью, дает возможность прогнозировать шероховатость обработанной поверхности по известным параметрам инструмента в зависимости от режимов обработки и использоваться при оптимизации процесса обработки.
7. Доказано, что при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами формируются сжимающие остаточные напряжения, при этом если в заготовке имеются остаточные напряжения растяжения, то они переформируются в остаточные напряжения сжатия на малой глубине.
8. Сведения об износостойкости эластичных полимерно-абразивных кругов при зачистке поверхностей, полученные в результате проведенных экспериментальных исследований, необходимы при выборе оптимальных инструмента и режимных параметров обработки и корректировки натяга инструмента по мере его износа.

9. Экспериментально установлено, что для рассматриваемых эластичных полимерно-абразивных кругов при обработке деталей из алюминиевых сплавов рекомендуются следующие допустимые режимы обработки: для кругов FS-WL 8A MED, FS-WL 6S FIN, DB-WL 8S MED: деформация ( $\Delta Y$ ) 0,5–2 мм, скорость ( $V$ ) 200–700 м/мин, подача ( $S$ ) 42–395 мм/мин; для круга FS-WL 2S CRS: деформация ( $\Delta Y$ ) 1–3 мм, скорость ( $V$ ) 250–1000 м/мин, подача ( $S$ ) 42–395 мм/мин; для круга CF-FB 0,5A FIN: деформация ( $\Delta Y$ ) 3–4,5 мм, скорость ( $V$ ) – 250–1000 м/мин, подача ( $S$ ) 42–395 мм/мин.

10. Достижимая шероховатость в пределах допустимых деформации круга и скорости резания при обработке сплава В95пчТ2 составляет: для круга FS-WL 8A MED –  $Ra$  1,5 – 2,5; для круга FS-WL 6S FIN –  $Ra$  0,7– 1,6; для круга FS-WL 2S CRS –  $Ra$  2,1– 3,6; для круга DB-WL 8S MED –  $Ra$  1,1 – 2,0; для круга CF-FB 0,5A FIN –  $Ra$  1,4 – 2,1. При дальнейшей оптимизации процесса финишной обработки, достижимая шероховатость обрабатываемой поверхности будет использована в качестве ограничительной функции.

11. Из всех исследованных полимерно-абразивных кругов наиболее эффективными являются: FS-WL 2S CRS – прессованный, высокопористый, обладающий наименьшей засаливаемостью и хорошей вентиляцией воздуха в увеличенных порах; CF-FB 0,5A FIN– очень эластичный, собранный из лепестков нетканого абразивосодержащего Clean & Finish, обладающий хорошей облегаемостью переменных по форме поверхностей и кромок.

## 4 Технологическое обеспечение качества поверхности при скруглении острых кромок радиальными полимерно-абразивными щетками и эластичными полимерно-абразивными кругами<sup>1</sup>

В рамках данного раздела реализуется система оптимального управления проектированием операций финишной обработки полимерно-абразивными инструментами путем создания подсистем в пространстве состояний по теоретическому моделированию сил взаимодействия ворсин радиальных полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой кромкой (подсистема третьего уровня), а также по математическому моделированию производительности процесса и качества обработки кромок, износа эластичных полимерно-абразивных кругов и радиальных полимерно-абразивных щеток на основе экспериментальных данных (подсистемы четвертого уровня).

### 4.1 Обработка острых кромок полимерно-абразивными радиальными щетками

#### 4.1.1 Исследование характеристик полимерно-абразивных щеток

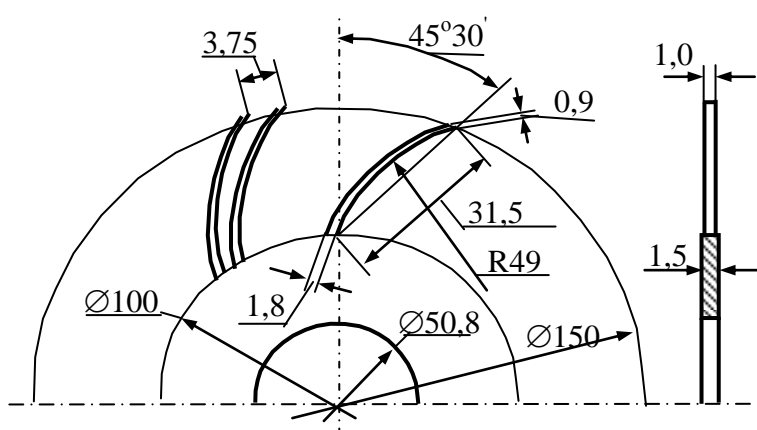


Рисунок 4.1 – Диск щетки С ВВ-ZB, 135 ворсин

Для проведения теоретических и экспериментальных исследований в настоящей работе использовались щетки компании 3М марок С ВВ-ZB с изогнутыми ворсинами (рисунок 4.1) и А ВВ-ZB – с прямыми ворсинами (рисунок 4.2). Данные щетки представляют собой тонкие диски, изготовленные из полимерного материала, имеющие гибкие ворсины по окружности. По всему объему полимера равномерно распреде-

лены зерна абразивного материала 3М<sup>TM</sup> Cubitron<sup>TM</sup> [270].

Из нескольких дисков, показанных на рисунках 4.1–4.2, на оправке собирается щетка практически любой ширины.

Кроме приведенных геометрических параметров, при исследовании процесса обработки этим инструментом необходимо знать физико-механические свойства материала щетки, а именно: его плотность, осевой момент инерции и модули упругости первого рода при изгибе и смятии.

<sup>1</sup> Результаты данных исследований опубликованы автором лично и в соавторстве в работах [61, 64, 65, 66, 74, 78, 81, 179, 182, 183, 184, 186, 279, 284].

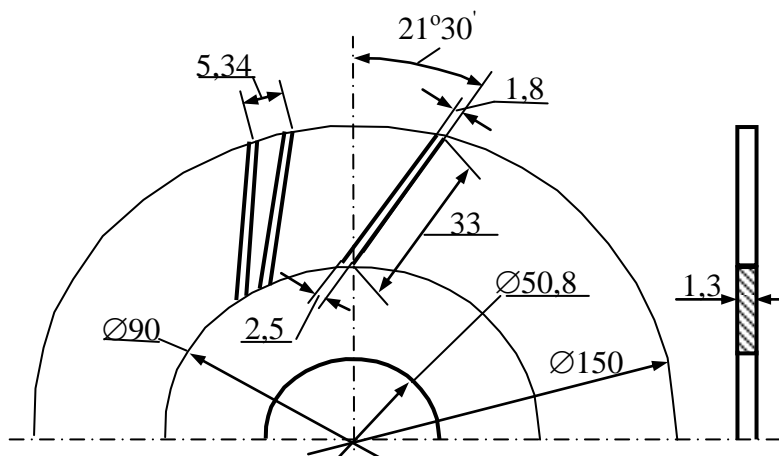


Рисунок 4.2 – Диск щетки А ВВ-ZB, 90 ворсин

**Плотность материала**  $\gamma_e$  определялась путем взвешивания диска на аналитических весах (см. рисунок 2.21) и определением объема вытесненной жидкости при размещении диска в свернутом состоянии в мензурку. Результаты вычисления плотности приведены в таблице 4.1.

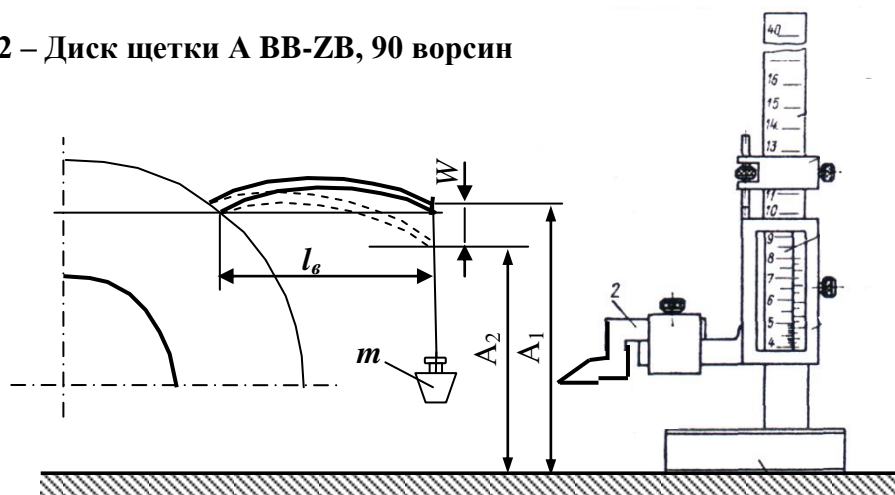


Рисунок 4.3 – Схема определения прогиба ворсины для расчета модуля упругости на изгиб  $E$

Модуль упругости первого рода на изгиб определялся на самостоятельно изготовленной установке, приведенной на рисунке 4.3.

Диск закреплялся в тисках так, чтобы одна из ворсин располагалась строго горизонтально, рейсмасом измерялось расстояние  $A_1$  от плиты до вершины ворсины, затем на конец ворсины подвешивался груз  $m$  и измерялся размер  $A_2$ . Деформация определялась как  $W = A_1 - A_2$ . Измерения производились на двух ворсинах.

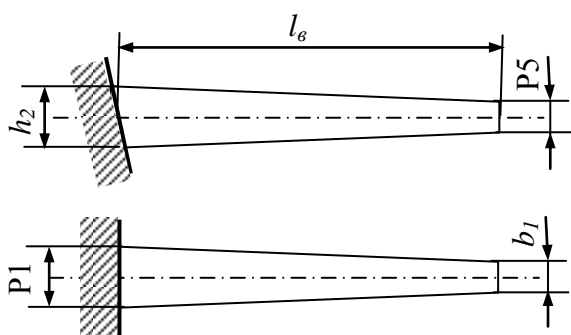


Рисунок 4.4 – Ворсина

Модуль упругости рассчитывался согласно

$$[212] \text{ по формуле: } E = \frac{P \cdot l_B^3}{3 \cdot J_{\text{ср}} \cdot W}. \quad (4.1)$$

В формуле (4.1):  $P$  – нормальная составляющая силы, изгибающей ворсину;  $J_{\text{ср}}$  – средний осевой момент инерции по сечениям в точке закрепления и на вершине ворсины:  $J_{\text{ср}} = \frac{b_2 \cdot h_2^3 + b_1 \cdot h_1^3}{24}$ ,

где  $b_2$ ,  $b_1$ ,  $h_2$ ,  $h_1$  – высота и ширина ворсины, приведенные на рисунке 4.4.

Для щеток С ВВ-ZB  $J_{хсп} = 0,3098 \text{ мм}^4$ , а для щеток А ВВ-ZB –  $J_{хсп} = 1,162 \text{ мм}^4$ .

Результаты измерения и расчета напряжений, а также модуля упругости для исследованных щеток представлены в таблице 4.1.

**Таблица 4.1 – Значения плотности материала и модуля упругости ворсин щеток**

Марка	Плотность г/см <sup>3</sup>	Зерни- тость	$P, \text{ Н}$	$W_1,$ мм	$W_2,$ мм	$E_1,$ Н/мм <sup>2</sup>	$E_2,$ Н/мм <sup>2</sup>	$E_{1,2}$ Н/мм <sup>2</sup>	$E_{ср},$ Н/мм <sup>2</sup>
С ВВ-ZB P120	1,586	P120	0,0196	2,4	2,5	274,6	263,6	269,1	268,1
			0,049	6,0	7,5	274,6	263,6	269,1	
			0,098	10,2	13,0	321,1	353,2	288,1	
С ВВ-ZB P220	1,510	P220	0,0098	2,0	1,0	164,8	329,6	247,2	252,2
			0,0196	3,5	2,5	188,3	263,6	225,9	
			0,049	7,5	6,0	219,7	274,6	247,1	
			0,098	12,0	10,8	274,6	305,2	289,9	
С ВВ-ZB P400	1,647	P400	0,0098	1,5	2,2	219,7	149,8	184,7	235,6
			0,0196	3,0	3,2	219,7	206,0	212,8	
			0,049	6,5	6,8	253,5	242,3	247,9	
			0,098	11,0	11,2	299,6	294,3	296,9	
А ВВ-ZB P36	1,667	P36	0,049	1,8	1,7	280,6	297,1	288,8	318,4
			0,098	3,2	3,3	315,6	306,1	310,8	
			0,196	6,2	6,7	325,8	301,5	313,6	
			0,49	13,0	15,2	388,5	332,3	360,4	
А ВВ-ZB P50	1,545	P50	0,0196	0,8	0,8	252,5	252,5	252,5	311,3
			0,049	1,5	1,8	336,7	280,6	308,6	
			0,098	3,2	3,2	315,6	315,6	315,6	
			0,196	6,2	6,0	325,8	336,7	331,2	
			0,49	15,0	14,0	336,7	360,7	348,7	

Полученные материалы необходимы для разработки теоретических положений определения сил, действующих в процессе обработки, а также показателей качества обработанной поверхности и производительности процесса обработки.

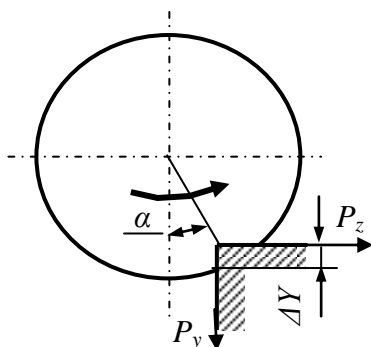
#### 4.1.2 Исследование сил, действующих на кромку детали при обработке полимерно-абразивными щетками

Исследование сил взаимодействия щетки с обрабатываемой кромкой необходимо при проектировании оборудования для автоматизированной и механизированной финишной обработки деталей, при проектировании новых конструкций щеток и прогнозировании производительности процесса и качества обработанной поверхности деталей.

**Таблица 4.2 – Параметры исследованных полимерно-абразивных щеток**

Марка щет- ки	Зерни- тость	$E,$ Н/мм <sup>2</sup>	$J_{хсп},$ мм <sup>4</sup>	Плотность $\gamma_в,$ г/мм <sup>3</sup>	$R_{ш},$ мм	$r_{ш},$ мм	$l,$ мм	$\beta,^\circ$
С ВВ-ZB	P120	268,1	0,3098	1,586	76	50	31,5	45°30'
С ВВ-ZB	P220	252,5		1,510				
С ВВ-ZB	P400	235,6		1,647				
А ВВ-ZB	P36	318,4	1,162	1,667	76	45	33	21°30'
А ВВ-ZB	P50	311,3		1,545				





**Рисунок 4.5 – Расположение обрабатываемой кромки относительно щетки**

При исследованиях использовались полимерно-абразивные щетки компании 3М марок С ВВ-ZВ с изогнутыми ворсинами (см. рисунки 2.10 и 4.1) и А ВВ-ZВ – с прямыми ворсинами (см. рисунки 2.11 и 4.2). Параметры использованных щеток приведены в таблице 4.2.

Взаимное расположение щетки и обрабатываемой кромки показано на рисунке 4.5. При этом угол  $\alpha$  должен быть оптимальным из условия обеспечения симметричного расположения радиуса скругления (см. п. 4.1.4).

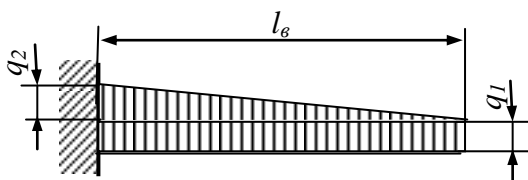
### *Силы на единичной ворсине*

Силы, возникающие при взаимодействии ворсины с обрабатываемой поверхностью, состоят из следующих компонентов: центробежная составляющая; упругая составляющая; динамическая (ударная) составляющая.

#### *Центробежная составляющая силы*

Ворсина в продольном сечении представляет собой трапецию с размерами, показанными на рисунке 4.6.

При вращении щетки создается центробежная сила, распределение которой также показано на рисунке 4.6. Масса щетины распределена по ее длине в виде трапеции, которая разбивается на две составляющие: прямоугольная (равномерно распределенная) с интенсивностью нагружения  $q_1$  и треугольная с интенсивностью  $q_2$ .



**Рисунок 4.6 – Схема нагрузки на ворсину**

Наибольшие прогибы на вершине ворсины [212] равны:

$$\text{для прямоугольного нагружения: } W_1 = \frac{q_1 \cdot l_B^4}{8 \cdot E \cdot J_{xcp}}; \quad (4.2)$$

$$\text{для треугольного нагружения: } W_2 = \frac{q_2 \cdot l_B^4}{30 \cdot E \cdot J_{xcp}}. \quad (4.3)$$

где  $E$  – модуль упругости первого рода при изгибе;

$J_{xcp}$  – средний осевой момент инерции по сечениям в точке закрепления и на вершине ворсины;

$l_B$  – длина ворсины (см. рисунок 4.3 и рисунок 4.6).

Единичная масса  $m_i$  на единице длины ворсины  $\Delta l_e$  при вращении со скоростью  $V_i$  создает единичную центробежную силу:  $q_1 = \frac{m_i \cdot V_i^2}{R_i}$ ,

где  $m_i$  – единичная масса;

$R_i$  – расстояние от центра круга до центра тяжести единичной массы;

$V_i$  – скорость движения единичной массы:  $V_i = \frac{\pi \cdot n \cdot R_i}{30}$ ,

где  $n$  – частота вращения, об/мин.

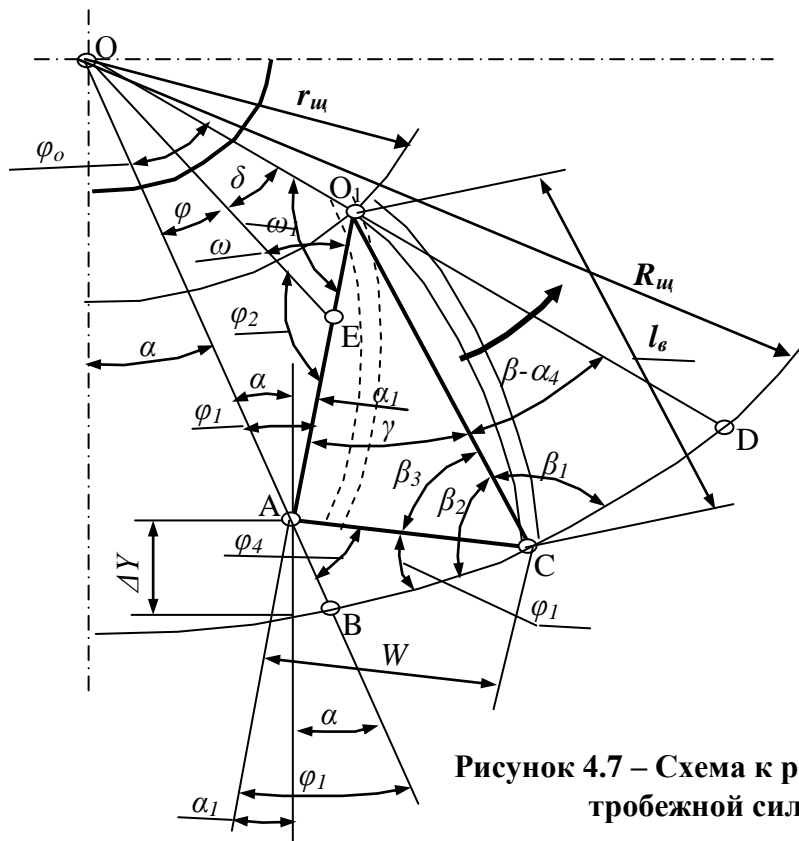
Величина  $R_i$ , в соответствии с рисунком 4.7, колеблется в пределах от  $R_i = R_{щ} \cdot \sin \alpha$  до  $R_i = r_{щ} \cdot \sin(\beta + \gamma)$ .

Средняя **единичная центробежная сила**  $q_1$  равна:  $q_{1cp} = m_1 \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{30}\right)^2 \cdot \frac{R_{щ} \cdot \sin \alpha + r_{щ} \cdot \sin(\beta + \gamma)}{2}$ ,

где  $m_1$  – единичная масса:  $m_1 = b_1 \cdot h_1 \cdot \Delta l_g \cdot \gamma_g$ .

Средняя **единичная центробежная сила**  $q_2$ , равна:  $q_{2cp} = m_2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{30}\right)^2 \cdot R_{щ} \cdot \sin \omega$ ,

где  $m_2$  – единичная масса,  $m_2 = (b_2 \cdot h_2 - b_1 \cdot h_1) \cdot \Delta l_g \cdot \gamma_g$ ;



**Рисунок 4.7 – Схема к расчету центробежной силы**

$b_2, b_1, h_2, h_1$  – размеры ворсины, показанные на рисунке 4.3;  $\gamma_g$  – плотность материала ворсины;  $R_{щ}$  – расстояние OE от оси щетки до центра тяжести треугольника с единичной центробежной

силой  $q_2$  (см. рисунок 4.7):  $R_{щ} = \frac{l_B \cdot \cos \gamma \cdot \sin \omega_1}{3 \cdot \sin \delta}$ .

По рисунку 4.7 углы  $\omega_1 = 180 - \varphi_0 - \varphi_1$ ;  $\omega = 180 - \delta - \omega_1$ .  $\delta = \varphi_0 - \varphi$ .

Из треугольника  $OO_1A$  (см. рисунок 4.7), при известных сторонах  $OO_1 = R_1$ ,  $O_1A = l_g \cdot \cos \gamma$  и угле

$\varphi_1$ , определяется  $\varphi_0$  [32]:  $\sin \varphi_0 = \frac{l_B \cdot \cos \gamma \cdot \sin \varphi_1}{r_{щ}}$ .

Угол  $\varphi$  определится из треугольника OEA. При известных  $AE = \frac{2}{3} \cdot l_B \cdot \cos \gamma$ ;

$OA = R_{ц} - \Delta Y / \cos \alpha$  и угле  $\varphi_1$  значение угла  $\varphi$  определится из выражений [32]:

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi_2 - \varphi}{2} = \frac{OA - OE}{OA + OE} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} \text{ и } \frac{\varphi_2 + \varphi}{2} = 90 - \frac{1}{2} \varphi_1.$$

Суммарный прогиб ворсины под действием центробежной силы, с учетом (4.2) и (4.3), равен:  $W_u = W_1 + W_2$ .

На обрабатываемую кромку действует сосредоточенная сила  $P_{ц}$ , перпендикулярная к ворсине, которая определится по выражению:  $P_{ц} = \frac{3 \cdot W_{ц} \cdot E \cdot J_{хср}}{l_{б}^3}$ .

### **Упругая составляющая силы**

Прогиб ворсины от действия упругой составляющей силы равен общему прогибу  $W$ :

$$W_{yn} = W.$$

Прогиб ворсины  $W$  определяется по рисунку 4.7.

$$\text{Из треугольника } O_1AC: \sin \gamma = \frac{W}{l_b}. \quad (4.4)$$

Учитывая, что  $\beta_{ц} = \beta - \alpha_4$ ;  $\alpha_4 = W_{ц} / l_e$  (в рад.);  $\beta_1 = 90 - \beta_{ц}$ ;

$$\beta_2 = 90 + \beta_{ц}; \beta_3 = \beta_2 - \varphi_1 = 90 - \gamma, \text{ получается: } \gamma = \varphi_1 - \beta_{ц}. \quad (4.5)$$

При заданной деформации щетки  $\Delta Y$  и угле наклона ворсин  $\beta$  (см. рисунки 4.5 и 4.7), прогиб ворсины определится из треугольника ACB [32] как:  $W = \frac{\Delta Y \cdot \cos \alpha}{\sin \varphi_1}$ . (4.6)

$$\text{Из уравнения (4.6) получается: } \sin \varphi_1 = \frac{\Delta Y \cdot \cos \alpha}{W}. \quad (4.7)$$

Принимая  $\sin \gamma = \gamma$  и  $\sin \varphi_1 = \varphi_1$  (углы  $\gamma$  и  $\varphi_1$  в радианах) и подставляя в выражение (4.5) уравнения (4.4) и (4.7), получаем:  $\frac{W}{l_b} = \frac{\Delta Y \cdot \cos \alpha}{W} - \beta_{ц} \cdot \frac{\pi}{180}$ . (4.8)

После преобразования уравнения (4.8) получается:

$$\frac{1}{l_b} \cdot W^2 + \beta_{ц} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot W - \Delta Y \cdot \cos \alpha = 0.$$

$$\text{Искомая величина прогиба ворсины: } W = \frac{-\beta_{ц} \cdot \frac{\pi}{180} + \sqrt{\left(\beta_{ц} \cdot \frac{\pi}{180}\right)^2 + \frac{4}{l_b} \Delta Y \cdot \cos \alpha}}{\frac{2}{l_b}}.$$

Упругая составляющая силы, перпендикулярная к ворсине, определяется как:

$$P_{уп} = \frac{3 \cdot W \cdot E \cdot J_{хср}}{l_b^3}.$$

### **Ударная составляющая силы**

В момент встречи ворсины с обрабатываемой кромкой происходит удар, в результате которого возникает ударная сила  $P_{уд}$ .

$$\text{Ударный импульс согласно [41] равен: } J = m_B \cdot V_n = P_{уд} \cdot \tau_{уд}, \quad (4.9)$$

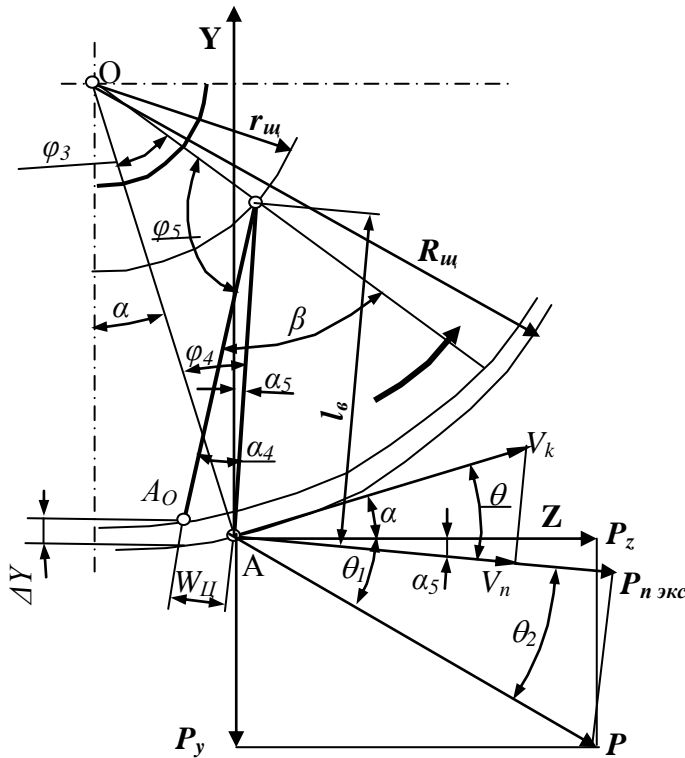


Рисунок 4.8 – Схема к расчету  $P_{yд}$

Из треугольника  $OO_1A$ , при известных  $OO_1 = r_{щ}$ ,  $OA = R_{щ} - (\Delta Y / \cos \alpha)$  и угле  $\varphi_3$ , определяется угол  $\varphi_4$  [32]. При этом:  $\varphi_3 = \frac{(\beta - \alpha_4) \cdot l_B}{R_{щ}}$ .

Из уравнений:  $\operatorname{tg} \frac{\varphi_5 - \varphi_4}{2} = \frac{R_{щ} \frac{\Delta y}{\cos \alpha} - r_{щ}}{R_{щ} \frac{\Delta y}{\cos \alpha} + r_{щ}} \operatorname{ctg} \frac{\varphi_3}{2}$  и  $\frac{\varphi_5 + \varphi_4}{2} = 90 - \frac{\varphi_3}{2}$  определяются углы  $\varphi_5$  и  $\varphi_4$ .

Искомый угол (по рисунку 4.8) определится как:  $\alpha_5 = \varphi_4 - \alpha$ .

Согласно работе [159], в соответствии с теорией Г. Герца, время удара определяется по

$$\text{формуле: } \tau_{уд} = 3,213 \left( \frac{m_B^2}{V_n \cdot K_M^2} \right)^{1/5}, \quad (4.10)$$

где  $K_M$  – коэффициент, зависящий от свойств материалов тел и кривизны их поверхностей:

$$K_M = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{1}{r_\phi}} \cdot \left( \frac{E_B}{1 - \mu_B^2} + \frac{E_k}{1 - \mu_k^2} \right),$$

где  $r_\phi$  – радиус скругления обрабатываемой кромки;

$\mu_B$  и  $\mu_k$  – коэффициенты Пуассона материала ворсины и материала обрабатываемой кромки соответственно.

Применительно к удару ворсины по закругленной кромке, степень  $1/5$  в уравнении (4.10) принята для щеток типа С, для щеток типа А она составляет 0,31.

$$\text{Сила удара из уравнения (4.9) равна: } P_{уд} = \frac{m_B \cdot V_n}{\tau_{уд}}.$$

где  $m_B$  – масса ворсины, участвующая в ударе (на конце ворсины), определяется из соотношения:  $m_B = \frac{l_B \cdot \gamma_B}{6} (2b_1 \cdot h_1 + b_2 \cdot h_2)$

(для щеток типа С:  $m_B = 3,07 \cdot 10^{-5}$  кг; для щеток типа А:  $m_B = 7,271 \cdot 10^{-5}$  кг);

$V_n$  – скорость удара ворсины по обрабатываемой кромке, перпендикулярная к ворсине:  $V_n = 2 \cdot \pi \cdot R_{щ} \cdot \frac{n}{60} \cdot \cos \theta$ ;

$\tau_{уд}$  – время удара ворсины.

Согласно схеме, приведенной на рисунке 4.8, угол  $\theta$  равен  $\theta = \alpha + \alpha_5$ .

При вращении щетки ворсина до момента контакта с обрабатываемой кромкой, под действием центробежной силы перемещается из точки А в точку  $A_0$  и поворачивается на угол  $\alpha_4 = \frac{W_{щ}}{l_B}$  (в радианах).

### Суммарная сила, действующая на кромку

На обрабатываемую кромку действует суммарная сила:  $P_{\text{сум}} = K_{\text{д}} \cdot K_{\text{yn}} \cdot (P_{\text{yд}} + P_{\text{ц}} + P_{\text{yn}})$ , где  $K_{\text{д}}$  – количество дисков в щетке (в экспериментах использовалась щетка с 8-ю дисками);  $K_{\text{yn}}$  – количество ворсин щеточного диска, одновременно действующих на кромку (при  $K_{\text{yn}} < 1$  следует принимать  $K_{\text{yn}} = 1$ ):  $K_{\text{yn}} = \frac{\tau_{\text{уп}}}{\tau_{\text{вр}}} = \frac{W \cdot N_{\text{в}}}{2 \cdot \pi \cdot R_{\text{щ}} \cdot n}$ ,

где  $\tau_{\text{yn}}$  – время нахождения ворсины в контакте с кромкой:  $\tau_{\text{уп}} = \frac{W}{V_{\text{к}}} = \frac{W \cdot 60}{2 \pi \cdot R_{\text{щ}} \cdot n}$ ;

$\tau_{\text{вр}}$  – время поворота щетки на 1 шаг:  $\tau_{\text{вр}} = \frac{60}{n \cdot N_{\text{д}}}$ ;  $N_{\text{д}}$  – количество ворсин в диске.

Поскольку при экспериментах острая кромка скруглялась с радиусом, зависящим от режимов обработки, в теоретических расчетах радиус  $r_{\text{т}}$  принимался исходя из фактических значений после обработки.

При экспериментальном исследовании нормальной и тангенциальной составляющих силы резания образцы из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2 (см. рисунок 2.13) с острыми кромками крепились в специальном приспособлении и обрабатывались на универсально-фрезерном станке марки Deckel Maho DMC 635V (см. рисунок 2.17).

Измерения проводились на трехкомпонентном динамометре фирмы Kistler (Швейцария), модель 9253B23 (см. рисунок 2.25).

Экспериментальная сила  $P_{\text{н экс}}$ , действующая перпендикулярно к ворсине, определяется как (см. рисунок 4.8):  $P_{\text{н экс}} = P \cdot \cos \theta_2$ ,

где  $P$  – равнодействующая по экспериментальным составляющим  $P_{\text{y}}$  и  $P_{\text{z}}$ :  $P = \sqrt{P_{\text{y}}^2 + P_{\text{z}}^2}$ .

угол  $\theta_2 = \theta_1 - \alpha_5$ , где угол  $\theta_1 = \arctg \frac{P_{\text{y}}}{P_{\text{z}}}$ .

Предварительные опыты на исследуемых щетках показали, что допустимыми, из условий стабильной работоспособности, параметрами по деформации щетки и скорости резания являются:  $\Delta Y = 1 - 5$  мм,  $V = 15 - 800$  м/мин. Подача  $S$  выбирается в зависимости от требуемой производительности процесса и возможностей оборудования.

При деформации щетки, скорости резания и подаче меньше вышеуказанных минимальных значений – процесс обработки не целесообразен по производительности. При увеличении деформации и скорости резания больше установленных пределов начинается интенсивное разрушение ворсин.

Результаты расчета сил по предложенным теоретическим моделям и экспериментальные данные приведены в таблице 4.3. Установлено, что расчетные и экспериментальные данные близки друг к другу.

Таблица 4.3 – Силы, действующие на обрабатываемую кромку

$V_k$ , м/мин	$\Delta Y$ , мм	С ВВ-ZВ, P120		С ВВ-ZВ, P220		С ВВ-ZВ, P400		А ВВ-ZВ, P36		А ВВ-ZВ, P50	
		$\alpha = 13^\circ 18'$		$\alpha = 7^\circ 34'$		$\alpha = 13^\circ 18'$		$\alpha = 0$		$\alpha = 0$	
		$P_n$ теор	$P_n$ экс	$P_n$ теор	$P_n$ экс	$P_n$ теор	$P_n$ экс	$P_n$ теор	$P_n$ экс	$P_n$ теор	$P_n$ экс
239	4	6,89	6,97	6,89	8,00	6,64	7,37	29,48	29,55	18,41	19,46
477		10,84	10,18	10,83	11,93	10,47	11,52	56,80	48,48	34,70	30,42
716		16,20	15,96	16,17	19,68	15,67	16,88	84,17	88,68	51,03	49,70
955		21,65	22,03	21,60	24,36	20,97	31,91	111,6	112,5	67,40	61,35
716	2	10,18	10,76	10,18	11,46	9,853	11,31	49,07	37,49	29,55	33,08
	3	13,33	12,99	13,32	15,58	12,90	13,04	67,65	60,72	40,89	39,33
	4	16,20	15,96	16,17	19,68	15,67	16,88	84,17	88,68	51,03	49,70
	5	18,80	17,41	18,76	21,10	18,17	19,39	99,17	99,49	60,31	70,71

Для определения силы  $P_z$ , которая потребуется для разработки управляющей подсистемы «Оптимизация процесса скругления острых кромок», необходимо воспользоваться рисунком 4.8:

$$P_z = P_{\text{сум}} \cdot \cos \alpha_5,$$

где  $\alpha_5 = \varphi_4 - \alpha$ ;  $\alpha = \arccos(R_{\text{ц}} - \Delta Y) / R_{\text{ц}}$ ;  $\varphi_4 = 2 \arctg(r_o / (p_r - r_{\text{ц}}))$ .

где  $p_r$  – полупериметр треугольника  $OO_1A$ :  $p_r = 0,5(R_{\text{ц}} + r_{\text{ц}} + l_b)$ ;

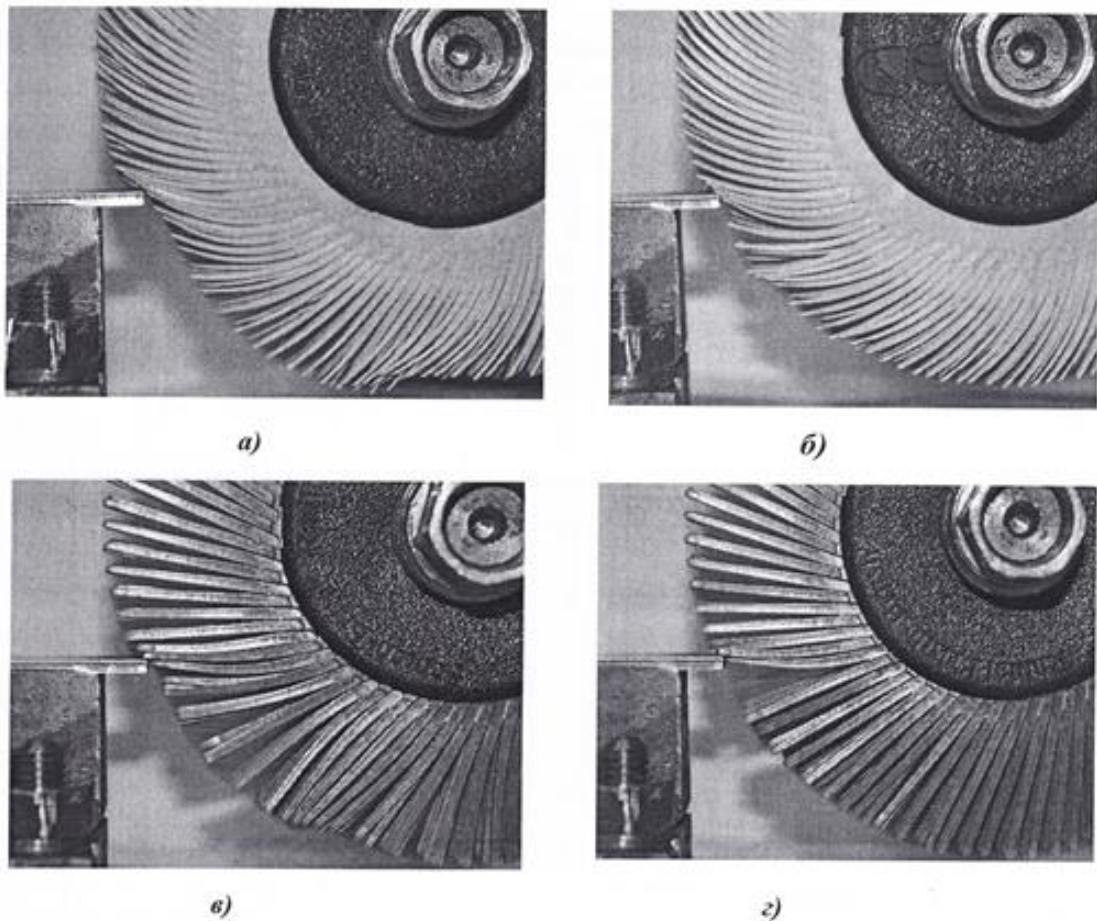
$r_o$  – радиус вписанной окружности в треугольник  $OO_1A$ :  $r_o = \sqrt{\frac{(p_r - R_{\text{ц}})(p_r - r_{\text{ц}})(p_r - l_b)}{p_r}}$ .

Полученные аналитические зависимости для расчета сил взаимодействия полимерно-абразивной щетки с обрабатываемой кромкой с успехом могут применяться при конструировании установок для обработки кромок и проектировании новых конструкций инструментов. Кроме того, по рассчитанным силам можно прогнозировать и управлять производительностью процесса и формированием качества обработанной поверхности.

Разработанную математическую модель силового взаимодействия ворсин радиальных полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой кромкой, которая является подсистемой третьего уровня, следует считать устойчивой в связи с тем, что воздействие возмущающих факторов (входных параметров) корректируется системой управления, рассмотренной в п. 2.1.2.

#### 4.1.3 Производительность процесса обработки кромок полимерно-абразивными щетками

При исследованиях использовались щетки компании 3М марок С ВВ-ZВ с изогнутыми ворсинами (см. рисунки 2.10 и 4.1) и А ВВ-ZВ – с прямыми ворсинами (см. рисунки 2.11 и 4.2). Данные щетки выпускаются в виде тонких дисков толщиной 1,5 мм из полимерного материала с гибкими ворсинами (135 для типа С и 90 – для типа А) по окружности. В таблице 4.4 приведены основные характеристики щеток диаметром 150 мм с рекомендуемой производителем частотой вращения 1200–4000 об/мин, использованных при исследованиях производительности процесса обработки.



**Рисунок 4.9 – Деформация ворсин щеток при обработке кромок:**  
*а* – щетка С ВВ-ZB P120 при 1600 об/мин; *б* – щетка С ВВ-ZB P120 при 500 об/мин;  
*в* – щетка А ВВ-ZB P50 при 1600 об/мин; *з* – щетка А ВВ-ZB P50 при 500 об/мин

Процесс съема заключается в микрорезании материала абразивными зернами при обкатывании обрабатываемой кромки ворсинами щетки. Это видно на фотографиях (рисунок 4.9), полученных при частотах вращения 1600 и 500 об/мин щеток С ВВ-ZB P120 и А ВВ-ZB P50.

**Таблица 4.4 – Характеристики радиальных полимерно-абразивных щеток**

Марка	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Зернистость	Средний осевой момент инерции $J_{хср}$ , мм <sup>4</sup>	Модуль упругости на смятие $E_{см.ср}$ Н/мм <sup>2</sup>	Модуль упругости на изгиб $E_{изг.ср}$ Н/мм <sup>2</sup>
С ВВ-ZB P120	1,586	P120	0,3098	299,31	268,1
С ВВ-ZB P220	1,510	P220	0,3098	282,56	252,2
С ВВ-ZB P400	1,647	P400	0,3098	305,12	235,6
А ВВ-ZB P36	1,667	P36	1,162	300,79	318,4
А ВВ-ZB P50	1,545	P50	1,162	284,90	311,3

При большей частоте вращения (см. рисунок 4.9, *а* и рисунок 4.9, *в*), деформированные ворсины возвращаются в исходное состояние, после восстановления упругой деформации, на дуге окружности щетки большей, чем при низкой частоте вращения (см. рисунок 4.9, *б* и рисунок 4.9, *з*). При этом ворсины не только приходят в исходное состояние, но и прогибаются под действием инерционной силы в противоположную сторону. За время выполнения щеткой пол-

ного оборота, ворсины успевают принять исходное положение и процесс их взаимодействия с обрабатываемой кромкой повторяется.

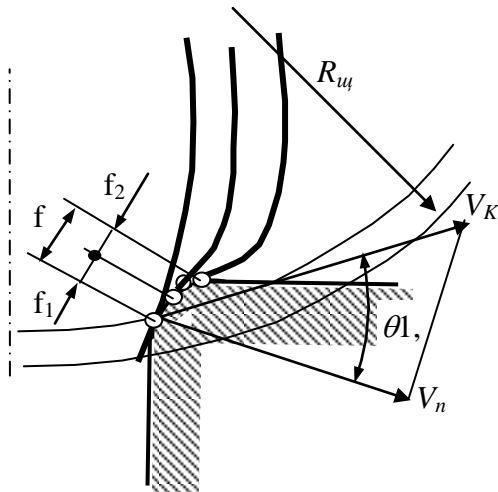


Рисунок 4.10 – Схема формирования кромки

Процесс формирования кромки при взаимодействии ворсин щетки с обрабатываемой заготовкой показан на рисунке 4.10. На участке  $f$  ворсина взаимодействует с обрабатываемой кромкой, на участке  $f_1$  происходит ударное воздействие ворсины, а на участке  $f_2$  – действуют только упругая и центробежная силы. Соотношение между размерами участков  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ , а также численными значениями составляющих сил резания зависит от режимов обработки и состояния обрабатываемой кромки.

### Параметры производительности процесса обработки

Параметры, характеризующие производительность процесса, оцениваются в поперечном сечении кромки (рисунок 4.11). К ним относятся: фактический радиус скругления кромки; относительный снятый слой кромки; количество материала, снятого при скруглении кромки.

#### Фактический радиус скругления

Представляет собой радиус окружности, построенной по трем точкам: А, В и точке на вершине дуги по размеру  $h$  (см. рисунок 4.11): 
$$r_{\phi} = \frac{x^2 + y^2 + 4h^2}{8h}, \quad (4.11)$$

где  $h = \left(\frac{x+y}{2}\right) \cdot \cos 45^\circ - p$ .

Этот параметр, как правило, задается на чертеже детали и подлежит контролю.

#### Относительный снятый слой кромки

Представляет собой фактический размер снятой кромки при обработке 1 мм ширины инструмента: 
$$\rho = \frac{p}{B_K}, \quad (4.12)$$

где  $p$  – снятый слой материала в мм (см. рисунок 4.11);  $B_K$  – ширина щетки в мм.

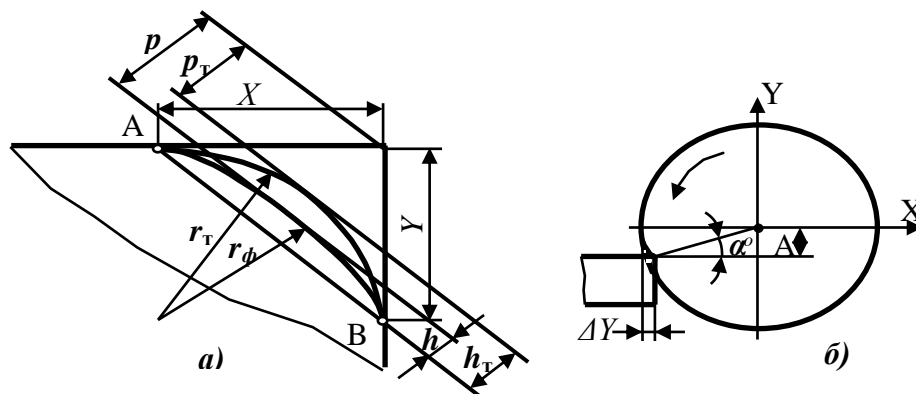
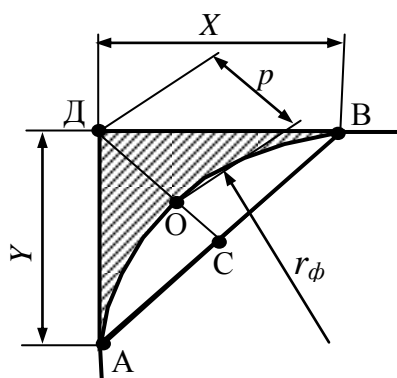


Рисунок 4.11 – Схемы к определению: а – параметров скругления; б – параметров  $\alpha$  и  $\Delta Y$



Данный параметр косвенно характеризует производительность процесса (интенсивность съема материала), удобен для использования в связи с простотой его определения.

*Количество материала, снятого при скруглении кромки*



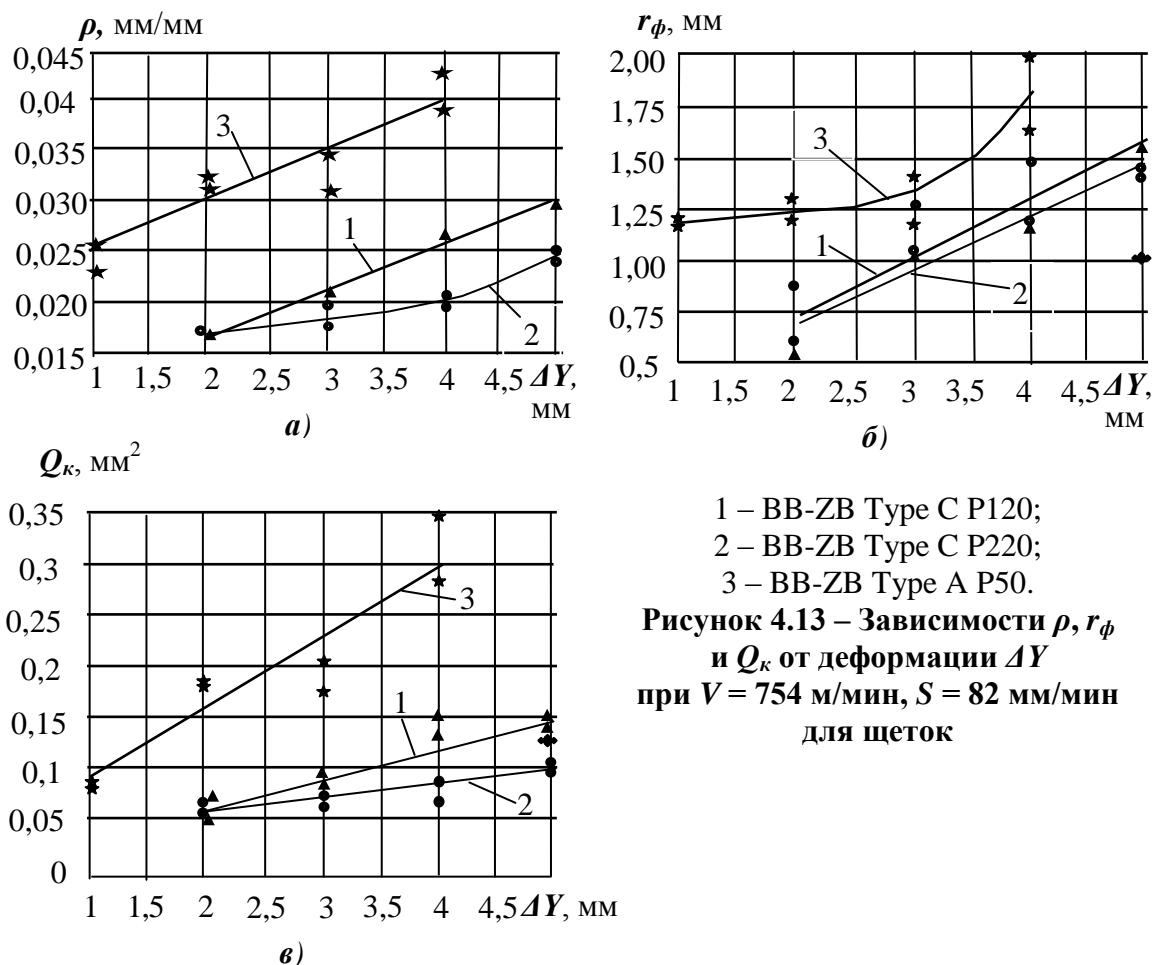
**Рисунок 4.12 – Схема к расчету площади  $Q_k$**

Этот параметр представляет собой площадь фигуры АД-ВО, которая равна разности площадей треугольника АДВ и сегмента АОВС, показанных на рисунке 4.12. С помощью данного параметра наиболее полно и объективно можно оценить производительность процесса обработки.

$$Q_k = \frac{X \cdot Y}{2} - \frac{1}{2} [l_1 \cdot r_\phi - a \cdot (r_\phi - h)], \quad (4.13)$$

где  $l_1 = AOB = \sqrt{X^2 + Y^2 + \frac{16}{3} \cdot h^2}$ ;  $r_\phi$  и  $h$  – см. уравнение (4.11).

Экспериментальные исследования производительности процесса скругления кромок в зависимости от режимных параметров обработки (деформации щетки  $\Delta Y$ , скорости ее вращения  $V$  и подачи  $S$ ) проводились на образцах из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2 (см. рисунок 2.13) на универсально-фрезерном станке (см. рисунок 2.17) щетками, характеристики которых приведены в таблице 4.4. Размеры  $X$ ,  $Y$  и  $p$  измерялись на большом инструментальном микроскопе БМИ-1Ц (см. рисунок 2.22) с точностью 1 мкм.



1 – ВВ-ZB Type C P120;  
2 – ВВ-ZB Type C P220;  
3 – ВВ-ZB Type A P50.  
**Рисунок 4.13 – Зависимости  $\rho$ ,  $r_\phi$  и  $Q_k$  от деформации  $\Delta Y$  при  $V = 754$  м/мин,  $S = 82$  мм/мин для щеток**

Параметры  $r_{\phi}$  и  $Q_k$  исследовались при ширине щетки 12 мм (8 дисков), а параметр  $\rho$  относился к 1 мм ширины щетки.

По итогам экспериментов установлено, что с увеличением деформации щетки все параметры производительности процесса увеличиваются. Это хорошо видно на рисунке 4.13, а, б и в, на котором представлены зависимости параметров производительности обработки кромок от режимных параметров обработки для трех щеток, являющимися типовыми представителями щеток типов А и С. Рост производительности объясняется увеличением силы взаимодействия ворсин щетки с обрабатываемой кромкой.

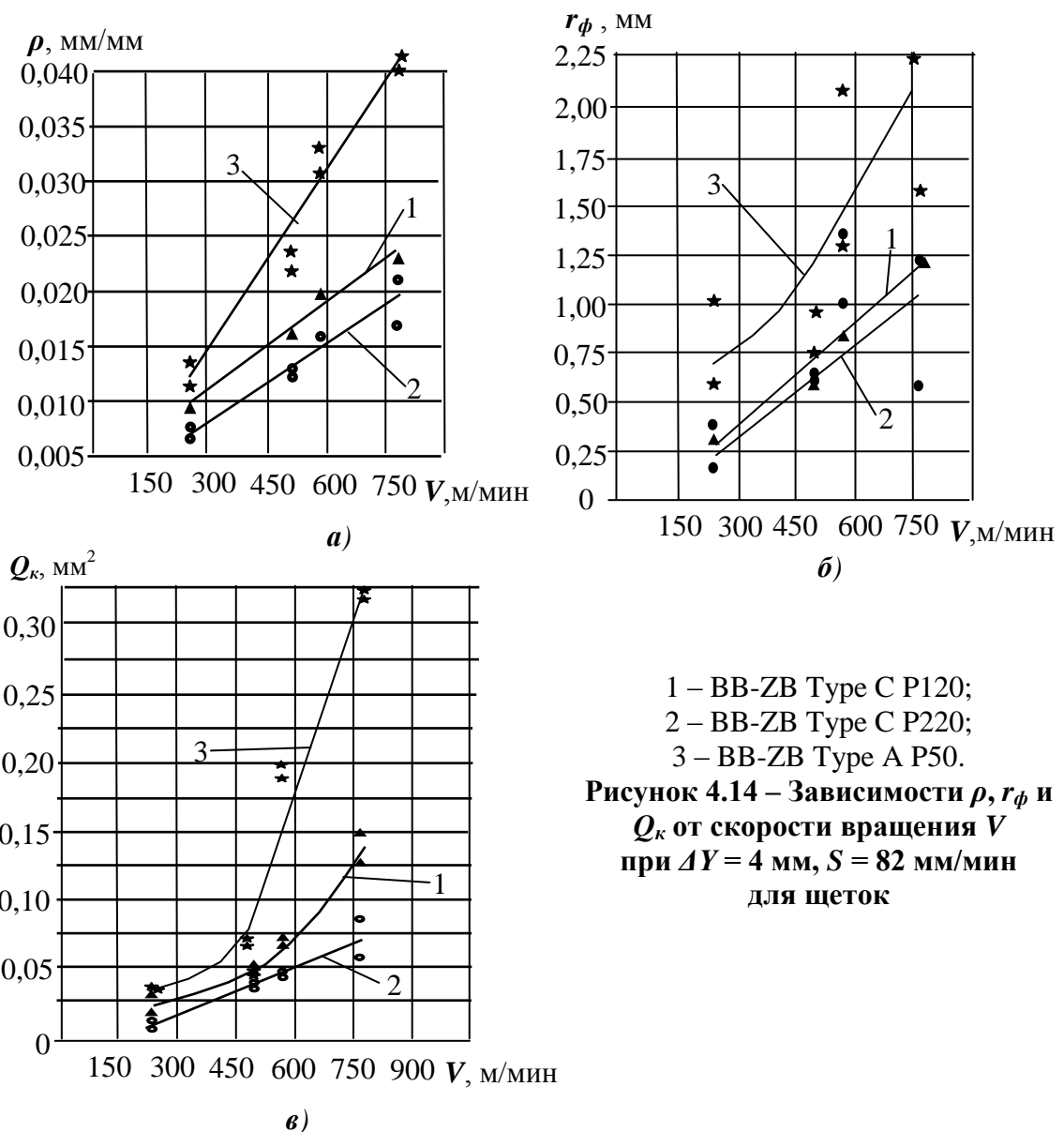


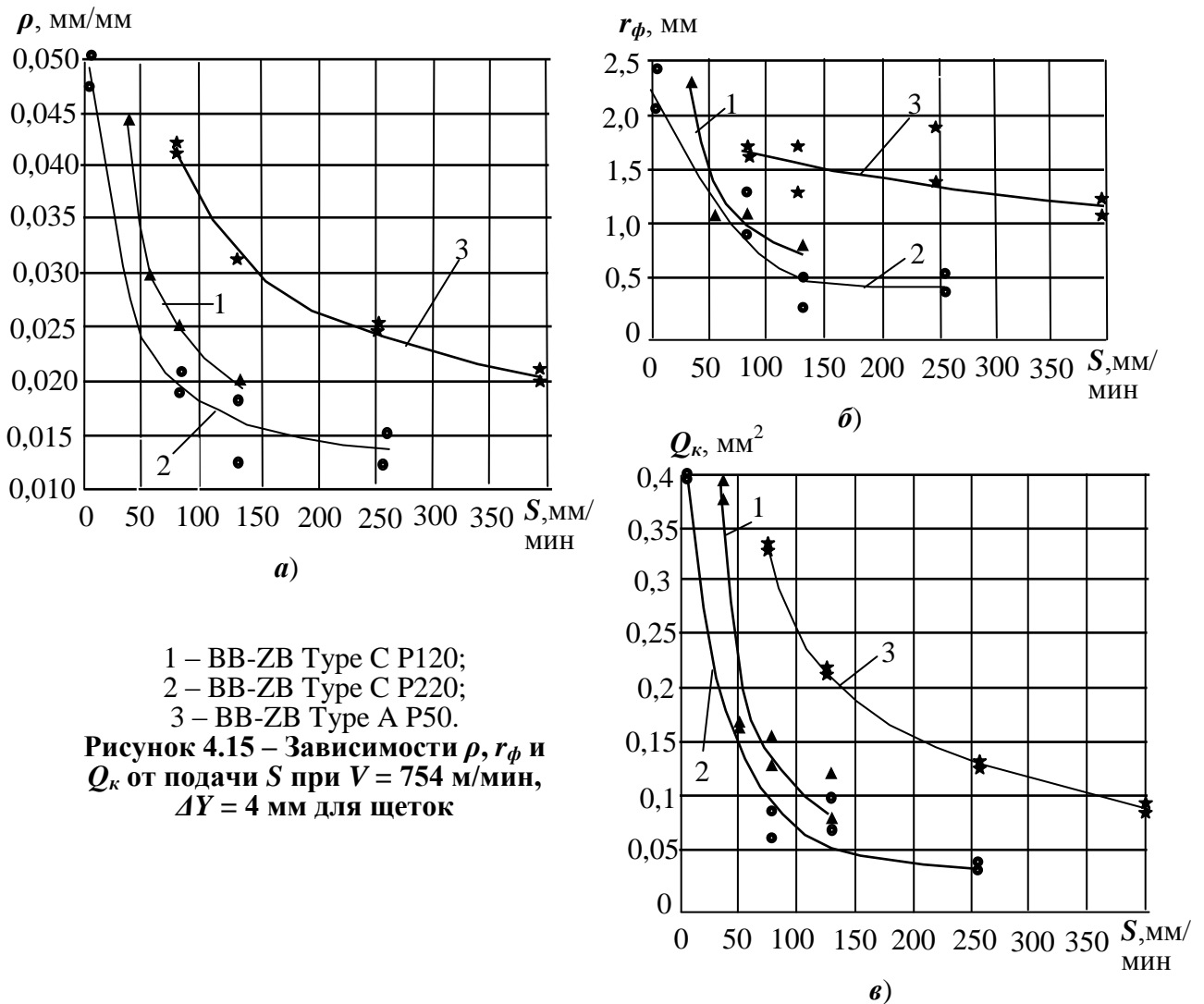
Рисунок 4.14 – Зависимости  $\rho$ ,  $r_{\phi}$  и  $Q_k$  от скорости вращения  $V$  при  $\Delta Y = 4 \text{ мм}$ ,  $S = 82 \text{ мм/мин}$  для щеток

У щеток типа С (с изогнутыми ворсинами): С ВВ-ZB P120 и С ВВ-ZB P220 производительность ниже по сравнению со щетками типа А (с прямыми ворсинами), поскольку их средний осевой момент инерции  $J_{xcp}$  и модуль упругости на изгиб  $E_{изг.ср.}$  (см. таблицу 4.4) меньше, а, следовательно, сила взаимодействия и производительность процесса ниже.

Различие в производительности по всем показателям  $\rho$ ,  $r_\phi$  и  $Q_k$  щеток С ВВ-ZB P120 и С ВВ-ZB P220 объясняется их разной зернистостью.

Зависимости  $\rho$ ,  $r_\phi$  и  $Q_k$  от скорости вращения щетки приведены на рисунке 4.14, а, б и в. Увеличение скорости резания также сопровождается ростом производительности процесса скругления кромки. Это объясняется увеличением центробежной и ударной составляющих силы взаимодействия ворсины с обрабатываемой кромкой.

С увеличением подачи интенсивность съема материала уменьшается. Это можно наблюдать на рисунке 4.15, а, б и в.



Заключение о значимости влияния рассматриваемого фактора  $\Delta Y$ ,  $V$  и  $S$  на параметры  $\rho$ ,  $r_\phi$  и  $Q_k$  получено с использованием критерия Фишера (см. п. 2.5.2) и представлено в таблице 4.5.  $F_{0,95}$  – критерий Фишера при доверительной вероятности 0,95. Этот критерий при степенях свободы  $f_1 = k - 1 = 3$  и  $f_2 = k(n - 1) = 8$  по справочным данным [199] равен  $F_{0,95} = 4,1$ .

Доверительные границы определены как  $\pm S_0 \cdot t$ , где  $t$  – квантиль Стьюдента. При количестве степеней свободы 11:  $t = 2,20$ .

По итогам проведения экспериментов, согласно методике, изложенной в п. 2.5, получены математические зависимости вышеописанных параметров производительности процесса от режимных параметров обработки. Для показателя  $\rho$  – уравнение (4.14), коэффициенты и свободный член которого приведены в таблице 4.6. Для радиуса скругления  $r_\phi$  – уравнение (4.15), коэффициенты и свободный член которого приведены в таблице 4.7. Для количества материала, снятого при скруглении кромки  $Q_k$  – уравнение (4.16), коэффициенты и свободный член которого приведены в таблице 4.8.

**Таблица 4.5 – Результаты дисперсионного анализа зависимостей величин  $\rho$ ,  $r_\phi$  и  $Q_k$  от скорости резания  $V$ , деформации инструмента  $\Delta Y$  и подачи вдоль кромки  $S$**

Марка щетки	Функция	$S_A^2$	$S_0^2$	$F=S_A^2/S_0^2$	Значимость влияния фактора	Доверительные границы $S_0 \cdot t$
ВВ-ZB Type C P120	$\rho = f(\Delta Y)$	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$6,04 \cdot 10^{-7}$	168,954	значимо	$\pm 1,71 \cdot 10^{-3}$
	$\rho = f(V)$	$1,03 \cdot 10^{-4}$	$1,46 \cdot 10^{-7}$	704,905	значимо	$\pm 8,4 \cdot 10^{-4}$
	$\rho = f(S)$	$3,31 \cdot 10^{-4}$	$5,21 \cdot 10^{-7}$	634,92	значимо	$\pm 1,588 \cdot 10^{-3}$
	$r_\phi = f(\Delta Y)$	0,531231 (мм <sup>2</sup> )	$4,5 \cdot 10^{-4}$ (мм <sup>2</sup> )	634,92	значимо	$\pm 0,04667$ мм
	$r_\phi = f(V)$	0,472431 (мм <sup>2</sup> )	$5,25 \cdot 10^{-4}$ (мм <sup>2</sup> )	899,868	значимо	$\pm 0,05041$ мм
	$r_\phi = f(S)$	1,39556 (мм <sup>2</sup> )	$1,142 \cdot 10^{-3}$ (мм <sup>2</sup> )	1222,384	значимо	$\pm 0,07434$ мм
	$Q_k = f(\Delta Y)$	$4,98 \cdot 10^{-3}$ (мм <sup>4</sup> )	$7,92 \cdot 10^{-5}$ (мм <sup>4</sup> )	68,904	значимо	$\pm 0,0196$ мм <sup>2</sup>
	$Q_k = f(V)$	$7,066 \cdot 10^{-3}$ (мм <sup>4</sup> )	$6,09 \cdot 10^{-5}$ (мм <sup>4</sup> )	115,989	значимо	$\pm 0,0172$ мм <sup>2</sup>
	$Q_k = f(S)$	0,048586 (мм <sup>4</sup> )	$1,92 \cdot 10^{-4}$ (мм <sup>4</sup> )	253,493	значимо	$\pm 0,0305$ мм <sup>2</sup>
ВВ-ZB Type C P220	$\rho = f(\Delta Y)$	$2,91 \cdot 10^{-5}$	$6,04 \cdot 10^{-7}$	48,218	значимо	$\pm 1,71 \cdot 10^{-3}$
	$\rho = f(V)$	$7,67 \cdot 10^{-5}$	$1,58 \cdot 10^{-6}$	48,434	значимо	$\pm 2,768 \cdot 10^{-3}$
	$\rho = f(S)$	$8,18 \cdot 10^{-4}$	$3,69 \cdot 10^{-6}$	221,881	значимо	$\pm 4,225 \cdot 10^{-3}$
	$r_\phi = f(\Delta Y)$	0,271711 (мм <sup>2</sup> )	$9,483 \cdot 10^{-3}$ (мм <sup>2</sup> )	28,651	значимо	$\pm 0,21424$ мм
	$r_\phi = f(V)$	0,433519 (мм <sup>2</sup> )	0,051283 (мм <sup>2</sup> )	8,453	значимо	$\pm 0,49821$ мм
	$r_\phi = f(S)$	2,164097 (мм <sup>2</sup> )	0,022292 (мм <sup>2</sup> )	97,081	значимо	$\pm 0,32847$ мм
	$Q_k = f(\Delta Y)$	$1,183 \cdot 10^{-3}$ (мм <sup>4</sup> )	$3,96 \cdot 10^{-5}$ (мм <sup>4</sup> )	29,895	значимо	$\pm 0,01384$ мм <sup>2</sup>
	$Q_k = f(V)$	$1,466 \cdot 10^{-3}$ (мм <sup>4</sup> )	$5,46 \cdot 10^{-5}$ (мм <sup>4</sup> )	26,855	значимо	$\pm 0,01626$ мм <sup>2</sup>
	$Q_k = f(S)$	0,083344 (мм <sup>4</sup> )	$9,17 \cdot 10^{-5}$ (мм <sup>4</sup> )	909,212	значимо	$\pm 0,02106$ мм <sup>2</sup>
ВВ-ZB Type C P400	$\rho = f(\Delta Y)$	$1,39 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$	69,611	значимо	$\pm 3,111 \cdot 10^{-3}$
	$\rho = f(V)$	$4,42 \cdot 10^{-4}$	$1,83 \cdot 10^{-6}$	241,273	значимо	$\pm 2,979 \cdot 10^{-3}$
	$\rho = f(S)$	$2,57 \cdot 10^{-4}$	$3,96 \cdot 10^{-7}$	648,421	значимо	$\pm 1,384 \cdot 10^{-3}$
	$r_\phi = f(\Delta Y)$	0,224075 (мм <sup>2</sup> )	0,011908 (мм <sup>2</sup> )	18,817	значимо	$\pm 0,24008$ мм
	$r_\phi = f(V)$	1,035764 (мм <sup>2</sup> )	0,08375 (мм <sup>2</sup> )	12,367	значимо	$\pm 0,63667$ мм
	$r_\phi = f(S)$	0,169722 (мм <sup>2</sup> )	0,029167 (мм <sup>2</sup> )	5,819	значимо	$\pm 0,37572$ мм
	$Q_k = f(\Delta Y)$	0,027206 (мм <sup>4</sup> )	$3,75 \cdot 10^{-4}$ (мм <sup>4</sup> )	72,548	значимо	$\pm 0,0426$ мм <sup>2</sup>
	$Q_k = f(V)$	0,056725 (мм <sup>4</sup> )	$5,83 \cdot 10^{-5}$ (мм <sup>4</sup> )	972,428	значимо	$\pm 0,0168$ мм <sup>2</sup>
	$Q_k = f(S)$	0,03293 (мм <sup>4</sup> )	$2,71 \cdot 10^{-5}$ (мм <sup>4</sup> )	1215,872	значимо	$\pm 0,01145$ мм <sup>2</sup>

$$\rho = a_1 \Delta Y^2 + a_2 V^2 + a_3 S^2 + a_4 \Delta Y + a_5 V + a_6 S + a_7 \Delta Y \cdot V + a_8 \Delta Y \cdot S + a_9 V \cdot S + a_{10} \Delta Y \cdot V \cdot S + a_{11}. \quad (4.14)$$

Таблица 4.6 – Коэффициенты в уравнении (4.14)

Зависимость	Коэф- фициент	ВВ-ZB Type C P120	ВВ-ZB Type C P220	ВВ-ZB Type C P400	ВВ-ZB Type A P36	ВВ-ZB Type A P50
$\rho = f(\Delta Y, V, S)$	$a_1$	$1,655 \cdot 10^{-4}$	$9,656 \cdot 10^{-5}$	$8,2768 \cdot 10^{-5}$	$6,18 \cdot 10^{-4}$	$7,416 \cdot 10^{-4}$
	$a_2$	$1,3018 \cdot 10^{-8}$	$1,6875 \cdot 10^{-8}$	$9,1125 \cdot 10^{-9}$	$6,075 \cdot 10^{-9}$	$4,86 \cdot 10^{-8}$
	$a_3$	$-1,042 \cdot 10^{-6}$	$-1,085 \cdot 10^{-7}$	$-1,042 \cdot 10^{-6}$	$-2,779 \cdot 10^{-8}$	$-2,918 \cdot 10^{-9}$
	$a_4$	$1,696 \cdot 10^{-3}$	$1,2365 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$1,4838 \cdot 10^{-3}$
	$a_5$	$1,1699 \cdot 10^{-6}$	$1,3649 \cdot 10^{-6}$	$7,96 \cdot 10^{-6}$	$5,3066 \cdot 10^{-6}$	$7,9598 \cdot 10^{-6}$
	$a_6$	$-3,122 \cdot 10^{-5}$	$-1,138 \cdot 10^{-5}$	$-1,093 \cdot 10^{-4}$	$-1,7 \cdot 10^{-5}$	$-6,375 \cdot 10^{-7}$
	$a_7$	$7,696 \cdot 10^{-9}$	$2,1548 \cdot 10^{-8}$	$1,005 \cdot 10^{-6}$	$6,702 \cdot 10^{-7}$	$6,702 \cdot 10^{-7}$
	$a_8$	$8,947 \cdot 10^{-8}$	$2,505 \cdot 10^{-7}$	$1,1688 \cdot 10^{-5}$	$5,565 \cdot 10^{-6}$	$5,565 \cdot 10^{-6}$
	$a_9$	$2,165 \cdot 10^{-10}$	$6,063 \cdot 10^{-10}$	$2,829 \cdot 10^{-8}$	$1,347 \cdot 10^{-8}$	$1,347 \cdot 10^{-8}$
	$a_{10}$	$-1,306 \cdot 10^{-10}$	$-3,66 \cdot 10^{-10}$	$-1,706 \cdot 10^{-8}$	$-8,125 \cdot 10^{-9}$	$-3,25 \cdot 10^{-8}$
	$a_{11}$	0,0166667	0,005833	0,0068125	0,0053333	-0,0065

$$r_\phi = a_1 \Delta Y^2 + a_2 V^2 + a_3 S^2 + a_4 \Delta Y + a_5 V + a_6 S + a_7 \Delta Y \cdot V + a_8 \Delta Y \cdot S + a_9 V \cdot S + a_{10} \Delta Y \cdot V \cdot S + a_{11}. \quad (4.15)$$

Таблица 4.7 – Коэффициенты в уравнении (4.15)

Зависимость	Коэф- фициент	ВВ-ZB Type C P120	ВВ-ZB Type C P220	ВВ-ZB Type C P400	ВВ-ZB Type A P36	ВВ-ZB Type A P50
$r_\phi = f(\Delta Y, V, S)$	$a_1$	$9,711 \cdot 10^{-3}$	0,012861	$5,8267 \cdot 10^{-3}$	0,0388444	0,0437
	$a_2$	$1,404 \cdot 10^{-7}$	$8,3268 \cdot 10^{-7}$	$1,264 \cdot 10^{-8}$	$7,0222 \cdot 10^{-7}$	$1,58 \cdot 10^{-6}$
	$a_3$	$9,998 \cdot 10^{-6}$	$-1,304 \cdot 10^{-6}$	$9,998 \cdot 10^{-6}$	$-2,499 \cdot 10^{-7}$	$-9,998 \cdot 10^{-7}$
	$a_4$	-0,0592	$5,791 \cdot 10^{-3}$	-0,0444	$-4,153 \cdot 10^{-5}$	$-4,933 \cdot 10^{-3}$
	$a_5$	$-1,925 \cdot 10^{-4}$	$-2,536 \cdot 10^{-7}$	$-8,662 \cdot 10^{-4}$	$4,009 \cdot 10^{-5}$	$-1,444 \cdot 10^{-5}$
	$a_6$	$-5,756 \cdot 10^{-3}$	$-7,507 \cdot 10^{-5}$	$-5,756 \cdot 10^{-3}$	$-3,23 \cdot 10^{-8}$	$-3,837 \cdot 10^{-6}$
	$a_7$	$4,822 \cdot 10^{-4}$	$2,0964 \cdot 10^{-4}$	$4,822 \cdot 10^{-4}$	$4,059 \cdot 10^{-7}$	$4,822 \cdot 10^{-5}$
	$a_8$	$-6,222 \cdot 10^{-4}$	$-1,025 \cdot 10^{-6}$	$-6,222 \cdot 10^{-4}$	$-1,746 \cdot 10^{-7}$	$-2,074 \cdot 10^{-5}$
	$a_9$	$2,889 \cdot 10^{-6}$	$3,8062 \cdot 10^{-9}$	$2,889 \cdot 10^{-6}$	$8,106 \cdot 10^{-10}$	$9,63 \cdot 10^{-8}$
	$a_{10}$	$-1,044 \cdot 10^{-6}$	$-3,096 \cdot 10^{-10}$	$-1,044 \cdot 10^{-6}$	$-5,86 \cdot 10^{-13}$	$-6,961 \cdot 10^{-11}$
	$a_{11}$	0,61	-0,095652	0,54	-0,044444	0,05

$$Q_x = a_1 \Delta Y^2 + a_2 V^2 + a_3 S^2 + a_4 \Delta Y + a_5 V + a_6 S + a_7 \Delta Y \cdot V + a_8 \Delta Y \cdot S + a_9 V \cdot S + a_{10} \Delta Y \cdot V \cdot S + a_{11}. \quad (4.16)$$

Таблица 4.8 – Коэффициенты в уравнении (4.16)

Зависимость	Коэф- фициент	ВВ-ZB Type C P120	ВВ-ZB Type C P220	ВВ-ZB Type C P400	ВВ-ZB Type A P36	ВВ-ZB Type A P50
$Q_x = f(\Delta Y, V, S)$	$a_1$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,389 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
	$a_2$	$1,5628 \cdot 10^{-7}$	$4,389 \cdot 10^{-10}$	$4,389 \cdot 10^{-10}$	$-5,49 \cdot 10^{-9}$	$-1,098 \cdot 10^{-8}$
	$a_3$	$-4,85 \cdot 10^{-7}$	$-7,406 \cdot 10^{-7}$	$-5,332 \cdot 10^{-6}$	$3,663 \cdot 10^{-7}$	$7,325 \cdot 10^{-7}$
	$a_4$	0,01928	$5,111 \cdot 10^{-6}$	$1,84 \cdot 10^{-3}$	-0,01425	-0,0285
	$a_5$	$2,8528 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^{-8}$	$7,1 \cdot 10^{-8}$	$-4,464 \cdot 10^{-5}$	$-8,928 \cdot 10^{-5}$
	$a_6$	$-2,361 \cdot 10^{-4}$	$-3,333 \cdot 10^{-5}$	$-2,4 \cdot 10^{-4}$	$-4,184 \cdot 10^{-4}$	$-8,368 \cdot 10^{-4}$
	$a_7$	$1,0645 \cdot 10^{-5}$	$2,301 \cdot 10^{-5}$	$2,301 \cdot 10^{-5}$	$4,2563 \cdot 10^{-5}$	$8,513 \cdot 10^{-5}$
	$a_8$	$3,3948 \cdot 10^{-7}$	$-4,628 \cdot 10^{-9}$	$4,628 \cdot 10^{-9}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$1,16 \cdot 10^{-4}$
	$a_9$	$1,7024 \cdot 10^{-8}$	$-1,023 \cdot 10^{-8}$	$-1,023 \cdot 10^{-8}$	$2,3925 \cdot 10^{-7}$	$4,785 \cdot 10^{-7}$
	$a_{10}$	$-2,88 \cdot 10^{-7}$	$-6,331 \cdot 10^{-9}$	$-6,331 \cdot 10^{-9}$	$-1,295 \cdot 10^{-7}$	$-2,59 \cdot 10^{-7}$
	$a_{11}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	0,0472	0,04	0,0841	0,17875

Для установления влияния силы взаимодействия ворсин щетки на производительность процесса скругления кромки, были проведены экспериментальные исследования.

Исследование проводилось на образцах из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2 с острыми кромками (см. рисунок 2.13), которые крепились при помощи специального приспособления и обрабатывались на универсально-фрезерном станке марки Deckel Maho DMC 635V (см. рисунок 2.17).

Силы измерялись на трехкомпонентном динамометре фирмы Kistler (Швейцария), модель 9253B23 (см. рисунок 2.25).

При исследовании определялись нормальная  $P_y$  и тангенциальная  $P_z$  составляющих силы резания, по которым рассчитывалась нормальная к ворсинам составляющая  $P_n$ .

Результаты экспериментов: параметры  $\rho$ ,  $r_\phi$  и  $Q_k$ , а также силы, при различных значениях  $\Delta Y$  и  $V$  и постоянной подаче  $S = 82$  мм/мин приведены в таблице 4.9.

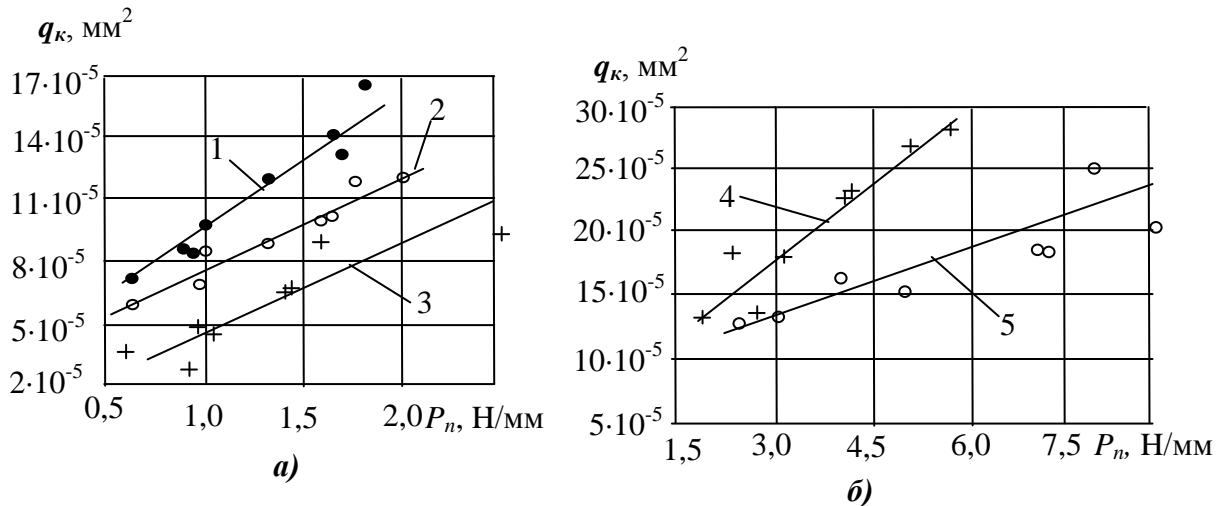
**Таблица 4.9 – Производительность процесса обработки и силы, действующие на обрабатываемую кромку**

Марка щётки	Параметры производительности процесса	Режимы обработки							
		$\Delta Y = 4$ мм				$V = 706,8$ м/мин			
		$V$ , м/мин				$\Delta Y$ , мм			
		235,6	471,2	706,8	942,4	2	3	4	5
С ВВ-ZB, P120 при $\alpha = 13^\circ 18'$	$\rho$ , мм/мм	0,010	0,017	0,023	0,027	0,016	0,020	0,024	0,028
	$r_\phi$ , мм	0,312	0,719	1,142	1,581	0,686	0,894	1,142	1,400
	$Q_k$ , мм <sup>2</sup>	0,071	0,086	0,118	0,167	0,080	0,097	0,118	0,140
	$q_k \cdot 10^5$ , мм <sup>2</sup>	7,215	8,740	11,99	16,97	8,130	9,858	11,99	14,23
	$P_{n \text{ экз}}$ Н/мм	0,581	0,848	1,330	1,836	0,897	1,082	1,330	1,451
	$P_{n \text{ экз}}$ Н	6,97	10,18	15,96	22,03	10,76	12,99	15,96	17,41
С ВВ-ZB, P220 при $\alpha = 7^\circ 34'$	$\rho$ , мм/мм	0,007	0,013	0,018	0,028	0,016	0,017	0,020	0,023
	$r_\phi$ , мм	0,362	0,698	1,127	1,648	0,667	0,883	1,127	1,396
	$Q_k$ , мм <sup>2</sup>	0,061	0,082	0,103	0,124	0,071	0,087	0,103	0,119
	$q_k \cdot 10^5$ , мм <sup>2</sup>	6,199	8,333	10,47	12,60	7,215	8,841	10,47	12,09
	$P_{n \text{ экз}}$ Н/мм	0,666	0,994	1,640	2,030	0,955	1,298	1,640	1,758
	$P_{n \text{ экз}}$ Н	8,00	11,93	19,68	24,36	11,46	15,58	19,68	21,10
С ВВ-ZB, P400 при $\alpha = 13^\circ 18'$	$\rho$ , мм/мм	0,008	0,01	0,015	0,019	0,008	0,010	0,011	0,011
	$r_\phi$ , мм	0,073	0,300	0,529	0,760	0,090	0,304	0,529	0,767
	$Q_k$ , мм <sup>2</sup>	0,029	0,050	0,071	0,092	0,024	0,046	0,071	0,098
	$q_k \cdot 10^5$ , мм <sup>2</sup>	2,947	5,081	7,215	9,349	2,439	4,675	7,215	9,959
	$P_{n \text{ экз}}$ Н/мм	0,614	0,96	1,407	2,659	0,942	1,087	1,407	1,616
	$P_{n \text{ экз}}$ Н	7,37	11,52	16,88	31,91	11,31	13,04	16,88	19,39
А ВВ-ZB, P36 при $\alpha = 0$	$\rho$ , мм/мм	0,014	0,033	0,040	0,041	0,029	0,030	0,038	0,038
	$r_\phi$ , мм	0,624	0,751	0,955	1,238	0,489	0,683	0,955	1,305
	$Q_k$ , мм <sup>2</sup>	0,135	0,157	0,180	0,202	0,082	0,155	0,180	0,247
	$q_k \cdot 10^5$ , мм <sup>2</sup>	13,72	15,95	18,29	20,53	8,333	15,75	18,29	25,10
	$P_{n \text{ экз}}$ Н/мм	2,462	4,040	7,390	9,375	3,124	5,060	7,390	8,291
	$P_{n \text{ экз}}$ Н	29,55	48,48	88,68	112,5	37,49	60,72	88,68	99,49

А ВВ-ZB, P50 при $\alpha = 0$	$\rho$ , мм/мм	0,010	0,024	0,040	0,050	0,021	0,029	0,035	0,043
	$r_{\phi}$ , мм	0,847	1,154	1,637	2,294	1,057	1,303	1,637	2,057
	$Q_k$ , мм <sup>2</sup>	0,135	0,181	0,227	0,271	0,138	0,180	0,227	0,280
	$q_k \cdot 10^5$ , мм <sup>2</sup>	13,72	18,39	23,07	27,54	14,02	18,29	23,07	28,45
	$P_{n \text{ эк}}$ Н/мм	1,622	2,535	4,142	5,112	2,757	3,277	4,142	5,892
	$P_{n \text{ эк}}$ Н	19,46	30,42	49,70	61,35	33,08	39,33	49,70	70,71

Для установления функциональной связи между производительностью и нормальной составляющей силы резания  $P_n$ , предложено в качестве параметра производительности принять  $q_k$  – количество материала, снятого при скруглении кромки шириной щетки  $B_k = 1$  мм и подаче  $S = 1$  мм/мин.:  $q_k = \frac{Q_k}{B_k \cdot S}$ .

На рисунках 4.16, а и 4.16, б показаны зависимости параметра производительности  $q_k$  от нормальной составляющей силы резания  $P_n$ , действующей на 1 мм ширины щетки, при различных значениях  $\Delta Y$  и  $V$ .



1 – ВВ-ZB Type C P120; 2 – ВВ-ZB Type C P220; 3 – ВВ-ZB Type C P400;  
4 – ВВ-ZB Type A P50; 5 – ВВ-ZB Type A P36.

Рисунок 4.16 – Зависимости  $q_k$  от силы  $P_n$  для щёток

Значения  $q_k$  и  $P_n$  приведены в таблице 4.9.

Получена зависимость параметра  $q_k$  от силы  $P_n$ , которая имеет вид:

$$q_k = (a \cdot P_n + c) \cdot 10^{-5}. \quad (4.17)$$

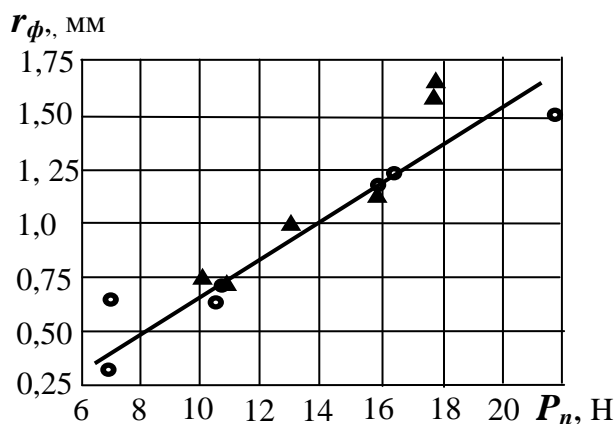
Коэффициенты и свободный член уравнения (4.17) для всех исследованных щеток приведены таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Коэффициенты и свободный член уравнения (4.17)

Щетка	$a$	$c$
С ВВ-ZB P120 при $\alpha = 13^\circ 18'$	7,8884	1,5184
С ВВ-ZB P220 при $\alpha = 7^\circ 34'$	4,6945	3,0702
С ВВ-ZB P400 при $\alpha = 13^\circ 18'$	3,8632	-0,3728
А ВВ-ZB P36 при $\alpha = 0$	1,66366	6,90325
А ВВ-ZB P50 при $\alpha = 0$	3,6059	7,1523

Таким образом, по известной силе, полученной теоретически или экспериментально, можно оценивать производительность процесса.

Анализ влияния силы взаимодействия ворсин с обрабатываемой кромкой на производи-



**Рисунок 4.17 – Зависимость радиуса скругления кромки от силы нормальной к ворсинкам**

тельность процесса по параметру  $r_\phi$  (фактический радиус скругления – см. формулу (4.11)), на примере щетки С ВВ-ZB P120, показал, что при любых режимах обработки, зависимость радиуса закругленной кромки от силы также имеет линейный характер (рисунок 4.17). Зависимости, представленные на рисунках 4.16 и 4.17, получены по методике, изложенной в п. 2.5.

Таким образом можно констатировать, что полученные аналитические

зависимости для расчета сил взаимодействия полимерно-абразивной щетки с обрабатываемой кромкой (см. п. 4.1.2) с успехом могут применяться при конструировании установок для обработки кромок и проектировании новых конструкций инструментов. Кроме того, по рассчитанным силам можно прогнозировать и управлять производительностью процесса и формированием качества обработанной поверхности.

#### 4.1.4 Качество поверхности при скруглении кромок полимерно-абразивными щетками

Для обоснованного выбора инструмента и режимных параметров обработки, необходимы знания об их влиянии на процесс формирования обрабатываемой кромки.

Процесс формирования кромки происходит за счет микрорезания абразивными зернами при ее обкатывании ворсинами щетки. Это видно на фотографиях (см. рисунок 4.9), полученных при частотах вращения 1600 и 500 об/мин щеток С ВВ-ZB P120 и А ВВ-ZB P50.

Процесс формирования кромки за счет взаимодействия с ней ворсин щетки, показан на рисунке 4.10.

Показателями, которыми следует оценивать качество обработанной кромки, являются геометрическая точность и шероховатость поверхности.

К параметрам, характеризующим геометрическую точность, относятся:

- отклонение месторасположения (позиционирование);
- относительная погрешность по круглости.



### Отклонение месторасположения (позиционирование)

Представляет собой (см. рисунок 4.11) относительное отклонение от симметричности расположения радиуса закругления:  $\delta = \frac{X-Y}{Z_k}$ , (4.18)

где  $X, Y$  – координаты перехода конца закругления в прямую линию (см. рисунок 4.11, а);

$Z_k$  – средняя величина по осям  $X$  и  $Y$ , которая определяется по выражению:  $Z_k = \frac{X+Y}{2}$ . (4.19)

В связи с тем, что на радиусы скругления предусмотрены допустимые предельные отклонения, на параметр  $\delta$  также имеются допуски.

Например, в самолетостроении по ОСТ 1.00022-80, предусмотрено скругление кромок на деталях: 0,5 мм с допустимыми отклонениями  $\pm 0,2$  мм.

По ГОСТ 30893.1-2002 (ИСО 2768-1-89) предусмотрены предельные отклонения притупленных кромок (наружных радиусов скругления и высот фасок):

- для точного (f) и среднего (m) классов точности –  $\pm 0,2$  мм;
- для грубого (c) и очень грубого (v) классов точности –  $\pm 0,4$  мм.

В переводе на относительную величину, для классов точности f и m допустимое значение показателя  $\delta$  равно:  $\delta = \frac{T_r}{\bar{X}_{min}} = \frac{0,4}{0,3} = 1,33$ ,

где  $T_r$  – допуск радиуса скругления;  $\bar{X}_{min}$  – наименьший предельный размер радиуса.

Для классов точности c и v –  $\delta = 0,8/0,3 = 2,66$ .

\*По отраслевому стандарту авиационной промышленности ОСТ 1. 00022-80 «Предельные отклонения размеров от 0,1 до 10000 мм и допуски формы и расположения поверхностей, неуказанные на чертеже» предусмотрено притупление наружных углов, ребер, кромок, размеры которых не указаны на чертеже, выполнять фаской от 0,1 до 0,4 мм.

### Относительная погрешность по круглости

Представляет собой отклонение формы по радиусу:  $k = \frac{\Delta h}{r_\phi}$ , (4.20)

где  $r_\phi$  – фактический радиус закругления, рассчитываемый по формуле (4.11);

$\Delta h$  – отклонение фактического сегмента от теоретического (см. рисунок 4.11):

$$\Delta h = h_T - h = p - p_T = p - 0,414 \cdot Z_k;$$

$h_T$  – теоретическая высота сегмента:  $h_T = 0,293 \cdot Z_k$ ;

$h$  – фактическая высота сегмента (см. рисунок 4.11, а):  $h = 0,707 \cdot Z_k - p$ ;

$p_T$  – теоретический размер снятой кромки:  $p_T = 0,414 \cdot Z_k$ ;

$p$  – фактический размер снятой кромки.

В переводе на относительную величину для классов точности f и m допустимый показатель  $k$  равен:  $k = \frac{0,414 T_r}{r_{min}} = \frac{0,414 \cdot 0,4}{0,3} = 0,552$ ,

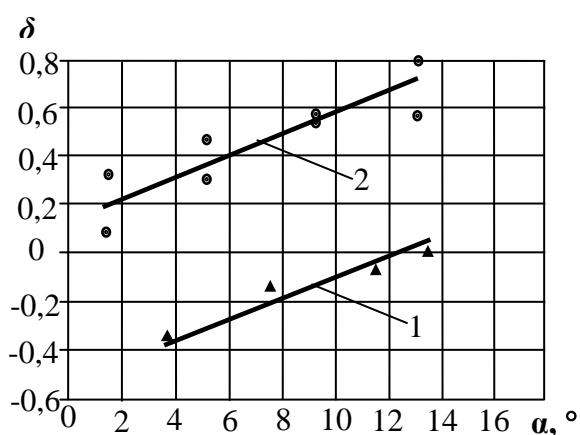
для классов точности c и v –  $k = (0,441 \cdot 0,8)/0,3 = 1,104$ .

Экспериментальные исследования проводились на образцах из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2 (см. рисунок 2.13) на универсально-фрезерном станке щетками, пара-

метры которых приведены в таблицах 4.2 и 4.4. Размеры  $X$ ,  $Y$  и  $r$  измерялись на большом инструментальном микроскопе БМИ-1Ц (см. рисунок 2.22) с точностью 1 мкм. Шероховатость поверхности кромки измерялась на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1 (см. рисунок 2.24).

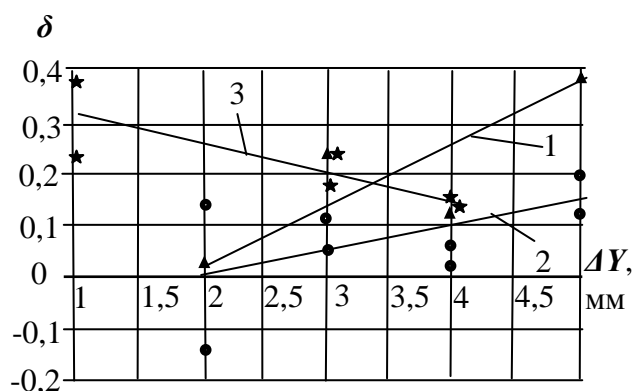
Отклонение месторасположения (позиционирование)  $\delta$  исследовано в зависимости от расположения щетки относительно обрабатываемой кромки (угол  $\alpha$  на рисунке 4.11, б), деформации щетки  $\Delta Y$ , подачи  $S$  и скорости резания  $V$ .

На рисунке 4.18 приведены зависимости показателя  $\delta$  от угла  $\alpha$  для щетки ВВ-ZB Type C P120 (как представителя щеток с изогнутыми ворсинами) и щетки ВВ-ZB Type A P50 (как представителя щеток с изогнутыми ворсинами). Абсолютно симметричное расположение кромка имеет при  $\delta = 0$ . Поэтому, при выборе режимов обработки необходимо назначить такой угол  $\alpha$ , при котором будет обеспечиваться  $\delta = 0$ .



1 – ВВ-ZB Type C P120 при  $\Delta Y=4$  мм,  
 $V_K=754$  м/мин,  $S=13$  мм/мин;  
 2 – ВВ-ZB Type A P50 при  $\Delta Y=2$  мм,  
 $V_K=754$  м/мин,  $S=82$  мм/мин.  
**Рисунок 4.18 – Зависимости  $\delta$  от угла  $\alpha$   
 для щеток**

Результаты исследования влияния деформации круга  $\Delta Y$  для щеток ВВ-ZB Type C P120 и ВВ-ZB Type C P220 с изогнутыми ворсинами, а также для щеток ВВ-ZB Type A P50 с прямыми ворсинами, показаны на рисунке 4.19.



1 – ВВ-ZB Type C P120 при  $\alpha=13^{\circ} 18'$ ;  
 2 – ВВ-ZB Type C P220 при  $\alpha=7^{\circ} 34'$ ;  
 3 – ВВ-ZB Type A P50 при  $\alpha=0$ .  
**Рисунок 4.19 – Зависимости  $\delta$   
 от деформации  $\Delta Y$   
 при  $V_K=754$  м/мин,  $S=82$  мм/мин  
 для щеток**

С увеличением деформации щеток типа С (с изогнутыми ворсинами), численное значение показателя  $\delta$  увеличивается, а при обработке щетками типа А (с прямыми ворсинами) – уменьшается. Это объясняется только различием в конструктивных особенностях ворсин щеток, а также

различием процесса огибания обрабатываемой кромки ворсиной. Это различие можно визуально наблюдать на рисунке 4.9.

Исследования влияния подачи и скорости резания на точность месторасположения (позиционирования) кромки  $\delta$  показали, что данные режимы обработки на него не влияют. Это подтверждено статистической обработкой экспериментальных данных по [199] (см. п. 2.5.2). Отношение дисперсии фактора  $S_A^2$  к генеральной дисперсии  $S_0^2$  ( $F = S_A^2/S_0^2$ ) для всех инструментов оказалось меньше квантиля распределения Фишера  $F_{(0,95)}$  при уровне значимости 0,95 (таблица 4.11).

Следует отметить, что для всех исследованных щеток и на всем диапазоне варьирования режимных параметров обработки, показатель  $\delta$  находится в пределах допуска.

**Таблица 4.11 – Отношение дисперсии фактора (угла  $\alpha$ , скорости резания  $V$ , подачи  $S$  и деформации щетки  $\Delta Y$ )  $S_A^2$  к генеральной дисперсии  $S_0^2$  для зависимостей  $\delta(\alpha)$ ,  $\delta(\Delta Y)$ ,  $\delta(V)$ ,  $\delta(S)$**

Инструмент	F для $\delta(\alpha)$	F для $\delta(\Delta Y)$	F для $\delta(V)$	F для $\delta(S)$	Критерий Фишера $F_{(0,95)}$
Щетка ВВ-ZB Type C P120	1993,067 (значимо)	22,23 (значимо)	0,851	0,558	9,1
Щетка ВВ-ZB Type A P50	11,644 (значимо)	11,765 (значимо)	1,384	0,764	9,1

На основании проведенных исследований с использованием типовых представителей щеток с изогнутыми ворсинками (ВВ-ZB Type C P120) и с прямыми ворсинками (ВВ-ZB Type A P50), согласно методике, изложенной в п. 2.5, получена математическая зависимость  $\delta$  от режимных параметров ( $\alpha$  и  $\Delta Y$ ), которая имеет вид:

$$\delta = a_1 \cdot \alpha^2 + a_2 \cdot \Delta Y^2 + a_3 \cdot \alpha + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot \Delta Y \cdot \alpha + a_6, \quad (4.21)$$

где  $\alpha$  – угол, характеризующий положение круга относительно обрабатываемой кромки в градусах;  $\Delta Y$  – деформация инструмента, мм.

Значения коэффициентов  $a_1$ – $a_5$  и свободного члена  $a_6$  приведены в таблице 4.12.

**Таблица 4.12 – Коэффициенты и свободный член уравнения (4.21)**

Коэффициент	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$
Щетка ВВ-ZB Type C P120	$1,067 \cdot 10^{-3}$	$2,35 \cdot 10^{-3}$	0,019533	0,011263	$9,16 \cdot 10^{-4}$	-0,51
Щетка ВВ-ZB Type A P50	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$-2,35 \cdot 10^{-3}$	0,019533	-0,01126	$9,16 \cdot 10^{-4}$	0,2508

При выборе режимов обработки необходимо обеспечить равенство нулю параметра  $\delta$ . Из уравнения (4.21) получена зависимость значения угла  $\alpha$  от деформации инструмента  $\Delta Y$ :

$$\alpha = \frac{\sqrt{(a_3 + a_5 \cdot \Delta Y)^2 - 4a_1 \cdot (a_2 \cdot \Delta Y^2 + a_4 \cdot \Delta Y + a_6)} - a_3 - a_5 \cdot \Delta Y}{2a_1}. \quad (4.22)$$

*Относительная погрешность по круглости* – это относительная величина, представляющая собой отношение отклонения фактического сегмента  $h$  (см. рисунок 4.11, *a*) от теоретического к фактическому радиусу скругления  $k = \frac{\Delta h}{r_{\phi}}$ . При идеально правильном радиусе скругления параметр  $k = 0$ .

Экспериментальные исследования зависимости показателя  $k$  от деформации щетки, подачи и скорости резания показали, что от режимных параметров обработки он не зависит. Это подтверждено статистической обработкой экспериментальных данных по [199]. Отношение дисперсии факторов (деформации, подачи и скорости)  $S_A^2$  к генеральной дисперсии  $S_0^2$  ( $F = S_A^2/S_0^2$  в пределах от 0,294 до 0,549) для всех инструментов оказалось меньше квантиля распределения Фишера  $F_{(0,95)} = 9,1$  при уровне значимости 0,95.

Среднеарифметическое значение по 24 экспериментам для всех исследованных щеток приведены в таблице 4.13. Для всех щеток фактические значения  $k$  не превышают допустимых.

Следует отметить, что показатель  $k$  зависит от конструктивных особенностей и механических свойств ворсины, а также от ее режущих способностей. В качестве показателя режущей способности можно воспользоваться количеством материала, снятого при скруглении кромки  $Q_k$ , мм<sup>2</sup> при  $\Delta Y = 4$  мм,  $V = 706, 8$  м/мин и  $S = 82$  мм/мин, также приведенного в таблице 4.13.

**Таблица 4.13 – Показатели  $k$  и  $Q_k$  для всех исследованных щеток**

Показатель	ВВ-ZB Type C P120	ВВ-ZB Type C P220	ВВ-ZB Type C P400	ВВ-ZB Type A P36	ВВ-ZB Type A P50
$k$	0,243	0,243	0,148	0,236	0,122
$Q_k$ , мм <sup>2</sup>	0,118	0,103	0,071	0,227	0,180

По данным, приведенным в таблице 4.13, видно, что погрешность по круглости хорошо коррелирует с режущей способностью щетки в пределах данного типа.

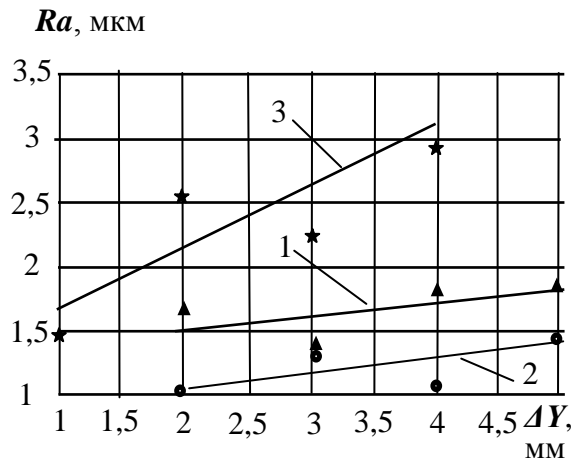
### ***Шероховатость обработанной кромки***

*Шероховатость обработанной кромки* исследована в зависимости от режимных параметров обработки: деформации щетки, подачи и скорости резания на приборе, показанном на рисунке 2.24 согласно методике, изложенной в п. Б.1 приложения Б.

На рисунке 4.20 и рисунке 4.21 показаны зависимости параметра шероховатости  $Ra$  от деформации щетки и от скорости. Как видно из рисунков, шероховатость с увеличением  $\Delta Y$  и  $V$  увеличивается. Это объясняется увеличением численных значений составляющих сил взаимодействия ворсин с обрабатываемой кромкой. От подачи параметр  $Ra$  не зависит.

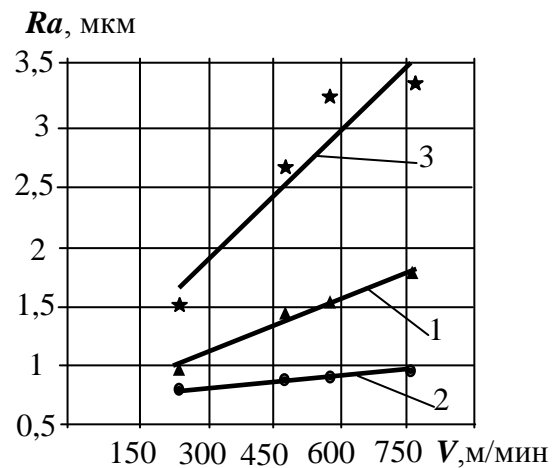
Заключение о значимости влияния рассматриваемого фактора  $\Delta Y$ ,  $V$  и  $S$  на параметр  $Ra$  получено с использованием критерия Фишера (см. п. 2.5.2) и представлено в таблице 4.14.  $F_{0,95}$  – критерий Фишера при доверительной вероятности 0,95. Этот критерий при степенях свободы  $f_1 = k - 1 = 3$  и  $f_2 = k(n - 1) = 8$  по справочным данным [199] равен  $F_{0,95} = 4,1$ .

Доверительные границы определены как  $\pm S_0 \cdot t$ , где  $t$  – квантиль Стьюдента. При количестве степеней свободы 11:  $t = 2,20$ .



- 1 – BB-ZB Type C P120;
- 2 – BB-ZB Type C P220;
- 3 – BB-ZB Type A P50.

**Рисунок 4.20 – Зависимости  $Ra$  от деформации  $\Delta Y$  при  $V=754$  м/мин,  $S=82$  мм/мин для щеток**



- 1 – BB-ZB Type C P120;
- 2 – BB-ZB Type C P220;
- 3 – BB-ZB Type A P50.

**Рисунок 4.21 – Зависимости  $Ra$  от скорости вращения  $V$  при  $\Delta Y=4$  мм,  $S=82$  мм/мин для щеток**

**Таблица 4.14 – Результаты дисперсионного анализа зависимостей величины  $Ra$  от скорости резания  $V$ , деформации инструмента  $\Delta Y$  и подачи вдоль кромки  $S$**

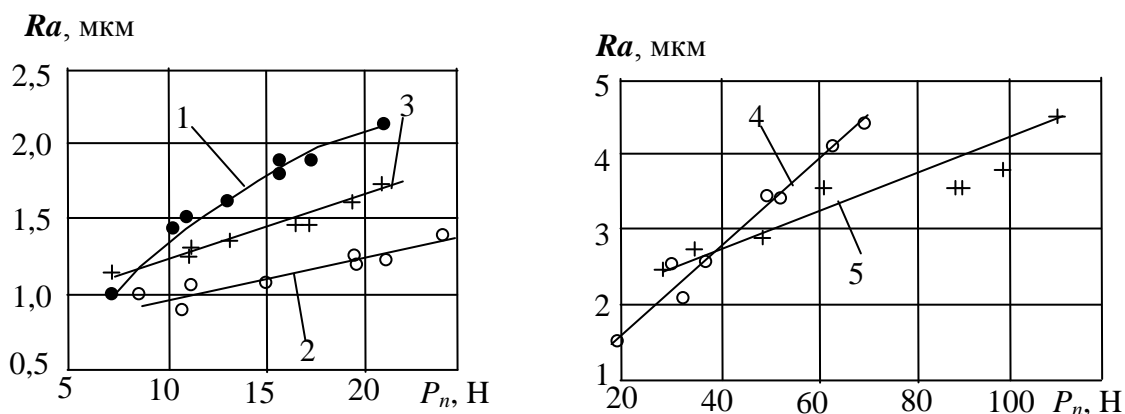
Марка щетки	Функция	$S_A^2$ , мкм <sup>2</sup>	$S_0^2$ , мкм <sup>2</sup>	$F=S_A^2/S_0^2$	Значимость влияния фактора	Доверительные границы $S_0 \cdot t$ , мкм
BB-ZB Type C P120	$Ra = f(\Delta Y)$	0,09688	$8,33 \cdot 10^{-4}$	116,25	значимо	$\pm 0,0635$
	$Ra = f(V)$	0,34	$8,33 \cdot 10^{-4}$	408,00	значимо	$\pm 0,0635$
	$Ra = f(S)$	0,0369	0,0296	1,246	не значимо	–
BB-ZB Type C P220	$Ra = f(\Delta Y)$	0,123	$2,083 \cdot 10^{-3}$	59,033	значимо	$\pm 0,1$
	$Ra = f(V)$	0,0183	$8,33 \cdot 10^{-4}$	22,00	значимо	$\pm 0,0635$
	$Ra = f(S)$	$9,167 \cdot 10^{-3}$	0,03896	0,235	не значимо	–
BB-ZB Type C P400	$Ra = f(\Delta Y)$	1,0852	$1,25 \cdot 10^{-3}$	868,167	значимо	$\pm 0,0778$
	$Ra = f(V)$	2,0885	$6,25 \cdot 10^{-4}$	3341,667	значимо	$\pm 0,055$
	$Ra = f(S)$	0,01889	0,0648	0,2915	не значимо	–

Для того, чтобы установить влияние силы взаимодействия ворсин щетки на шероховатость скругленной кромки, были проведены соответствующие экспериментальные исследования. Исследование проводилось на образцах из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2 с острыми кромками (см. рисунок 2.13), которые крепились в приспособлении и обрабатывались на универсально-фрезерном станке марки Deckel Maho DMC 635V (см. рисунок 2.17).

Силы измерялись на трехкомпонентном динамометре фирмы Kistler (Швейцария), модель 9253B23 (см. п. 2.4.3). При проведении экспериментов, определялись нормальная  $P_y$  и тан-

генциальная  $P_z$  составляющие силы резания, по которым рассчитывалась нормальная к ворсинкам составляющая  $P_n$ .

В результате исследований установлено, что шероховатость поверхности кромки растет с увеличением нормальной составляющей силы взаимодействия ворсин щетки с обрабатываемой кромкой (рисунок 4.22).



1 – BB-ZB Type C P120; 2 – BB-ZB Type C P220;  
3 – BB-ZB Type C P400; 4 – BB-ZB Type A P50;  
5 – BB-ZB Type A P36

**Рисунок 4.22 – Зависимость шероховатости  $Ra$  от силы  $P_n$  для щеток**

Результаты экспериментов по параметру  $Ra$ , а также по силам, при различных значениях  $\Delta Y$  и  $V$  и постоянной подаче  $S = 82$  мм/мин приведены в таблице 4.15.

**Таблица 4.15 – Шероховатость поверхности и силы, действующие на обрабатываемую кромку**

$V_k$ , м/мин	$\Delta Y$ , мм	С BB-ZB, P120		С BB-ZB, P220		С BB-ZB, P400		А BB-ZB, P36		А BB-ZB, P50	
		$\alpha = 13^\circ 18'$		$\alpha = 7^\circ 34'$		$\alpha = 13^\circ 18'$		$\alpha = 0$		$\alpha = 0$	
		$Ra$ , мкм	$P_n$ , Н эксп	$Ra$ , мкм	$P_n$ , Н эксп	$Ra$ , мкм	$P_n$ , Н эксп	$Ra$ , мкм	$P_n$ , Н эксп	$Ra$ , мкм	$P_n$ , Н эксп
239	4	1,03	6,97	1,0	8,00	1,17	7,37	2,51	29,55	1,55	19,46
477		1,39	10,18	1,05	11,93	1,28	11,52	2,89	48,48	2,55	30,42
716		1,68	15,96	1,33	19,68	1,48	16,88	3,54	88,68	3,39	49,70
955		1,91	22,03	1,82	24,36	1,75	31,91	4,45	112,5	4,06	61,35
716	2	1,49	10,76	0,81	11,46	1,30	11,31	2,73	37,49	2,05	33,08
	3	1,59	12,99	1,12	15,58	1,37	13,04	3,21	60,72	2,69	39,33
	4	1,68	15,96	1,33	19,68	1,48	16,88	3,54	88,68	3,39	49,70
	5	1,74	17,41	1,41	21,10	1,60	19,39	3,72	99,49	4,44	70,71

На основании проведенных исследований, согласно методике, описанной в п. 2.5, получена математическая зависимость шероховатости от деформации щетки и скорости резания, которая имеет вид:

$$Ra = a_1 \cdot \Delta Y^2 + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot \Delta Y + a_4 \cdot V + a_5 \cdot \Delta Y \cdot V + a_6 \quad (4.23)$$

Значения коэффициентов и свободного члена уравнения (4.23) приведены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Значения коэффициентов и свободных членов уравнений (4.23) и (4.24)

Зависимость	Коэффициент	ВВ-ZB Type C P120	ВВ-ZB Type C P220	ВВ-ZB Type C P400	ВВ-ZB Type A P36	ВВ-ZB Type A P50
$Ra = f(\Delta Y, V)$	$a_1$	-0,02	-0,058	$9,7 \cdot 10^{-3}$	-0,074	0,126
	$a_2$	$-5,703 \cdot 10^{-7}$	$2,045 \cdot 10^{-6}$	$7,034 \cdot 10^{-7}$	$2,38 \cdot 10^{-6}$	$-1,535 \cdot 10^{-6}$
	$a_3$	0,179	0,56	$5,7 \cdot 10^{-3}$	0,764	-0,2
	$a_4$	$1,596 \cdot 10^{-3}$	$-1,5 \cdot 10^{-3}$	$-1,631 \cdot 10^{-4}$	$-5,29 \cdot 10^{-4}$	$4,718 \cdot 10^{-3}$
	$a_5$	$7,938 \cdot 10^{-5}$	$6,089 \cdot 10^{-5}$	$4,014 \cdot 10^{-5}$	$1,164 \cdot 10^{-4}$	$1,627 \cdot 10^{-4}$
	$a_6$	0,2224	-0,12	0,95	0,525	-0,85
$Ra = f(P_n)$	$b$	0,047	0,0501	0,0216	0,0217	0,0556
	$c$	0,871	0,3992	1,0108	1,7588	0,4678

Установлено, что зависимость параметра шероховатости  $Ra$  от нормальной составляющей силы резания имеет линейный характер:  $Ra = b \cdot P_n + c$ . (4.24)

Значения коэффициента и свободного члена в (4.24) также приведены в таблице 4.16.

По итогам вышеописанных исследований можно сделать вывод о том, что использование полимерно-абразивных щеток для скругления кромок обеспечивает все требования по качеству обработанных кромок. Полученные зависимости позволяют определить режимные параметры обработки, при которых обеспечиваются все требования к качеству обработанной кромки.

Полученные эмпирические математические модели производительности процесса обработки и шероховатости скругленных кромок, являющиеся подсистемами четвертого уровня, следует считать устойчивыми в связи с тем, что воздействие возмущающих факторов (входных параметров) корректируется системой управления, рассмотренной в п. 2.1.2 и п. 7.1.

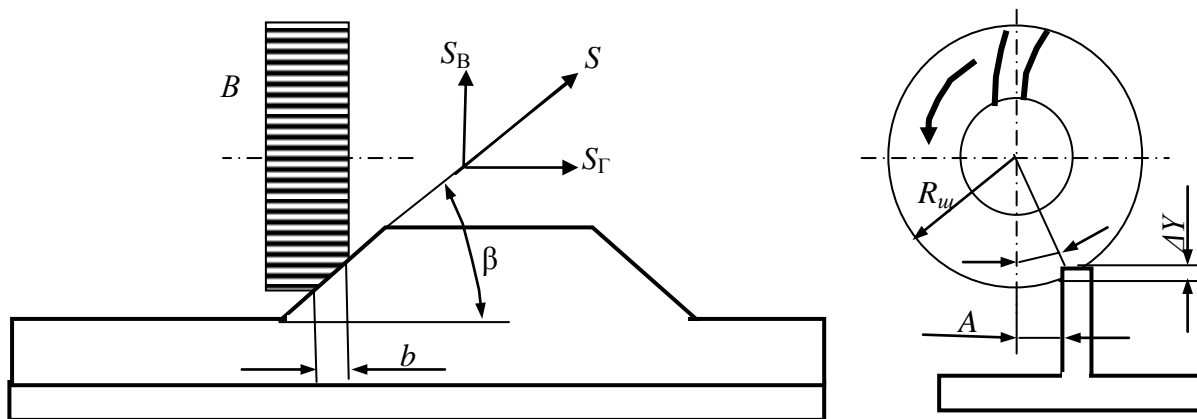
#### 4.1.5 Обработка кромок на наклонных поверхностях

В самолето- и вертолетостроении операции по притуплению острых кромок чаще всего выполняются вручную [256]. На длинномерных деталях, длина которых может достигать 10 м, такие операции являются весьма трудоемкими. Заменить ручной труд на механизированный и автоматизированный при обработке кромок возможно путем применения эластичных полимерно-абразивных кругов и радиальных полимерно-абразивных щеток.

Собственные исследования в этой области [64, 65, 186 и др.] подтвердили эффективность применения данных инструментов, поскольку они обеспечивают все требования по качеству обработанных кромок при высокой производительности.

При обработке длинномерных деталей возможны случаи, когда необходимо обработать кромку на наклонной поверхности без изменения наклона инструмента относительно детали. В данном случае весьма эффективным будет использование полимерно-абразивных щеток.

На рисунке 4.23 приведена схема взаимодействия полимерно-абразивной щетки с обрабатываемой кромкой, расположенной под углом  $\beta$  к поверхности стола станка.



**Рисунок 4.23 – Схема к расчету взаимодействия полимерно-абразивной щетки с наклонной обрабатываемой кромкой**

При заданной деформации щетки  $\Delta Y$  размер  $b = \Delta Y \cdot \operatorname{ctg} \beta$  может оказаться больше или меньше ширины щетки  $B$ .

Если  $b \leq B$ , то щетка участвует в контакте с кромкой детали только ее частью. При этом деформация щетки изменяется от наибольшего значения  $\Delta Y$  до нуля. В этом случае интенсивность съема материала будет меньше, чем на горизонтальном участке детали из-за меньшей ширины работающей части (равной  $b$ ) и средней деформации щетки (равной  $\Delta Y_{\text{cp.}} = 0,5 \cdot \Delta Y$ ).

Если  $b > B$ , то деформация щетки изменяется от наибольшего значения  $\Delta Y$  до наименьшего  $\Delta Y_1 = B \cdot \operatorname{tg} \beta$  при средней  $\Delta Y_{\text{cp.}} = 0,5(\Delta Y + \Delta Y_1)$ .

Для установления закономерностей влияния угла наклона обрабатываемой кромки  $\beta$  на ее формирование, проведены экспериментальные исследования. Исследования проводились на образцах из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2 и титанового сплава ВТ20 (см. рисунок 2.13) на универсально-фрезерном станке марки Deckel Maho DMC 635V (см. рисунок 2.17) щетками компании 3М марок ВВ-ZB-Туре С Р120 с изогнутыми ворсинами и ВВ-ZB-Туре А Р50 – с прямыми ворсинами (см. рисунки 2.10, 2.11, 4.1, 4.2).

Параметры использованных щеток приведены в таблицах 4.2 и 4.4. В экспериментах использовались щетки шириной  $B = 12$  мм.

Размеры  $X$  и  $Y$  (см. рисунок 4.11, а) измерялись на большом инструментальном микроскопе БМИ-1Ц с цифровым отсчетным устройством (см. рисунок 2.22).

Для оценки интенсивности формирования кромки использовался параметр  $Z_k$ , представляющий собой среднеарифметическое значение по измеренным значениям  $X$  и  $Y$  – формула (4.19). В качестве параметра, характеризующего точность месторасположения скругленной кромки (симметричность), принято относительное смещение  $\delta$  – формула (4.18).

В таблице 4.17 приведены результаты экспериментальных исследований интенсивности формирования кромки  $Z_k$  и относительного ее смещения  $\delta$  в зависимости от деформации щетки



$\Delta Y$  и угла наклона  $\beta$  при частоте вращения  $n = 1600$  об/мин и подаче  $S = 82$  мм/мин. Обработка образцов из В95пчТ2 велась щетками ВВ-ZB-Туре С и ВВ-ZB-Туре А P50 шириной  $B = 12$  мм.

Кроме того, в таблице 4.17 приведены рассчитанные по формулам значения  $b$ ,  $\Delta Y_I$  и  $\Delta Y_{cp}$ .

**Таблица 4.17 – Экспериментальные данные, полученные при обработке кромок образцов из В95пчТ2 щетками ВВ-ZB-Туре С и ВВ-ZB-Туре А P50 при  $n = 1600$  об/мин;  $S = 82$  мм/мин**

$\beta^\circ$	$b$ , мм	$\Delta Y_I$ , мм	$\Delta Y_{cp}$ , мм	$\Delta Y$ , мм	Щетка ВВ-ZB-Туре С P120 при $A=10$ мм ( $\alpha = 7,662^\circ$ )				Щетка ВВ-ZB-Туре А P50 при $A=0$				
					$X$ , мм	$Y$ , мм	$Z_k$ , мм	$\delta$	$X$ , мм	$Y$ , мм	$Z_k$ , мм	$\delta$	
0	$\infty$	3	2	2	0,455	0,37	0,412	0,206	0,65	0,77	0,71	– 0,169	
		6	3	3	0,574	0,407	0,49	0,34	0,78	0,63	0,705	0,213	
		9	4	4	0,65	0,583	0,616	0,109	0,98	0,85	0,915	0,142	
		12	5	5	0,727	0,494	0,61	0,382	–	–	–	–	
15°	11,2	3,2	0	1,5	3	0,672	0,548	0,610	0,203	0,686	0,480	0,583	0,353
	22,4		4,6	6	0,837	0,561	0,699	0,395	0,788	0,527	0,658	0,397	
	33,6		6,1	9	1,316	0,749	1,032	0,549	1,170	0,840	1,005	0,328	
	44,8		7,6	12	1,182	0,863	1,023	0,312	1,354	1,159	1,257	0,155	
30°	5,2	6,9	0	1,5	3	0,677	0,351	0,514	0,634	0,694	0,462	0,578	0,401
	10,4		3,0	6	1,123	0,597	0,860	0,611	1,091	0,556	0,823	0,650	
	15,6		7,9	9	1,044	0,535	0,789	0,645	1,507	0,850	1,179	0,557	
	20,8		9,4	12	1,585	0,849	1,217	0,605	1,718	0,973	1,346	0,553	
45°	3	0	1,5	3	0,665	0,235	0,450	0,955	1,017	0,438	0,728	0,796	
	6		3,0	6	1,032	0,305	0,669	1,087	1,229	0,384	0,807	1,047	
	9		4,5	9	1,408	0,489	0,948	0,968	1,587	0,657	1,122	0,829	
	12		6,0	12	1,835	0,642	1,239	0,963	1,921	0,768	1,344	0,857	
60°	1,7	0	1,5	3	0,404	0,070	0,237	1,409	0,772	0,192	0,482	1,203	
	3,5		3,0	6	0,969	0,141	0,555	1,492	0,796	0,205	0,500	1,181	
	5,2		4,5	9	1,065	0,212	0,639	1,335	1,045	0,288	0,667	1,135	
	6,9		6,0	12	1,365	0,250	0,807	1,381	1,390	0,269	0,830	1,351	

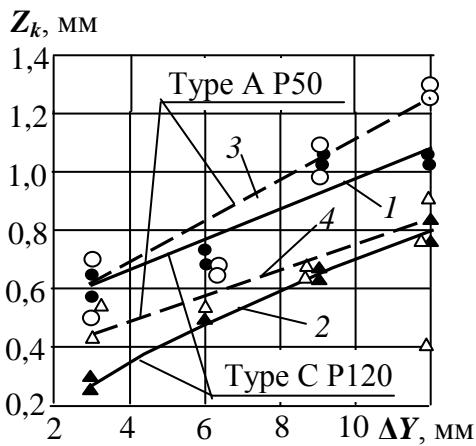
В таблице 4.18 приведены результаты экспериментальных исследований параметров  $Z_k$  и  $\delta$ , полученных при обработке кромок образцов из титанового сплава ВТ20, щетками ВВ-ZB-Туре С и ВВ-ZB-Туре А P50 шириной  $B = 12$  мм. Обработка велась при частоте вращения  $n = 1600$  об/мин и подаче  $S = 41$  мм/мин. При этом значения  $b$ ,  $\Delta Y_I$  и  $\Delta Y_{cp}$  соответствуют приведенным в таблице 4.17.

**Таблица 4.18 – Экспериментальные данные, полученные при обработке кромок образцов из ВТ20 щетками ВВ-ZB-Туре С P120 и ВВ-ZB-Туре А P50 при  $n = 1600$  об/мин;  $S=41$  мм/мин**

$\beta^\circ$	$\Delta Y$ , мм	Щетка ВВ-ZB-Туре С P120 при $A=10$ мм ( $\alpha = 7,662^\circ$ )				Щетка ВВ-ZB-Туре А P50 при $A=0$ ( $\alpha = 0^\circ$ )			
		$X$ , мм	$Y$ , мм	$Z_k$ , мм	$\delta$	$X$ , мм	$Y$ , мм	$Z_k$ , мм	$\delta$
0	2	0,260	0,253	0,256	0,035	0,468	0,573	0,520	–0,202
	3	0,343	0,330	0,336	0,038	0,619	0,524	0,572	0,166
	4	0,351	0,380	0,365	–0,077	0,830	0,852	0,841	–0,026
	5	0,456	0,492	0,474	–0,076	–	–	–	–

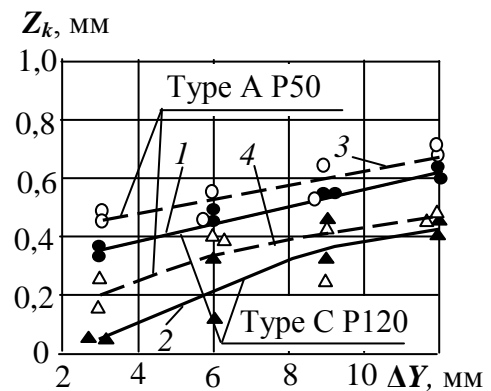
15°	3	0,437	0,294	0,365	0,391	0,573	0,381	0,477	0,402
	6	0,576	0,381	0,479	0,407	0,616	0,419	0,517	0,381
	9	0,665	0,430	0,548	0,429	0,727	0,457	0,592	0,456
	12	0,720	0,540	0,630	0,286	0,773	0,569	0,671	0,304
30°	3	0,554	0,241	0,398	0,786	0,479	0,232	0,356	0,694
	6	0,709	0,322	0,516	0,750	0,735	0,278	0,506	0,902
	9	0,820	0,422	0,621	0,640	0,782	0,380	0,581	0,692
	12	1,003	0,552	0,778	0,580	0,962	0,550	0,756	0,545
45°	3	0,459	0,154	0,306	0,995	0,616	0,255	0,436	0,828
	6	0,677	0,170	0,424	1,196	0,742	0,237	0,490	1,031
	9	0,856	0,289	0,573	0,990	0,700	0,260	0,480	0,916
	12	1,228	0,334	0,781	1,145	0,872	0,320	0,596	0,925
60°	3	0,086	0,042	0,064	0,687	0,34	0,090	0,215	1,163
	6	0,363	0,069	0,216	1,378	0,659	0,132	0,395	1,332
	9	0,676	0,113	0,394	1,427	0,539	0,108	0,324	1,330
	12	0,702	0,111	0,407	1,452	0,713	0,160	0,437	1,266

Результаты исследования показали (рисунок 4.24 и рисунок 4.25), что для материалов В95пчТ2 и ВТ20 с увеличением деформации щетки  $\Delta Y$  при различных значениях угла наклона поверхности  $\beta$ , размер обработанной кромки  $Z_k$  растет как при обработке щетками Type C P120 (сплошные линии), так и щетками Type A P50 (штриховые линии). Это объясняется ростом сил взаимодействия ворсин щетки с обрабатываемой кромкой. При этом у щеток с зернистостью P50 производительность выше, чем у щеток с зернистостью P120.



1, 3 – при  $\beta = 15^\circ$ ; 2, 4 – при  $\beta = 60^\circ$ .

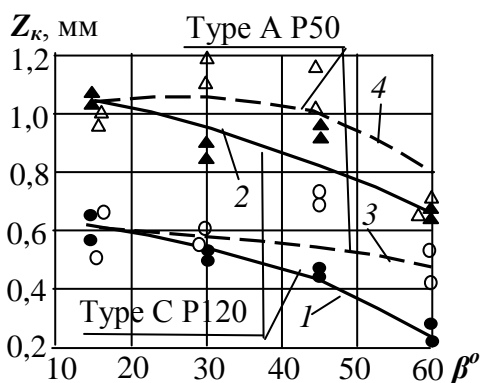
Рисунок 4.24 – Зависимость параметра  $Z_k$  от деформации щетки  $\Delta Y$  (В95пчТ2)



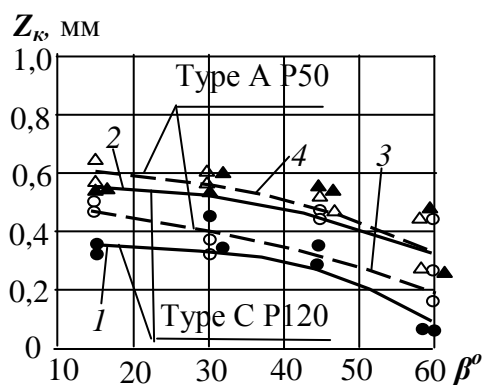
1, 3 – при  $\beta = 15^\circ$ ; 2, 4 – при  $\beta = 60^\circ$ .

Рисунок 4.25 – Зависимость параметра  $Z_k$  от деформации щетки  $\Delta Y$  (ВТ20)

Установлено (рисунок 4.26 и рисунок 4.27), что для материалов В95пчТ2 и ВТ20 с увеличением угла наклона поверхности  $\beta$  производительность падает как для щетки Type C P120, так и для щетки Type A P50. Причина заключается в уменьшении части ширины щетки  $b$ , участвующей в работе и уменьшении средней деформации щетки  $\Delta Y_{cp}$ . (см. таблицу 4.17).



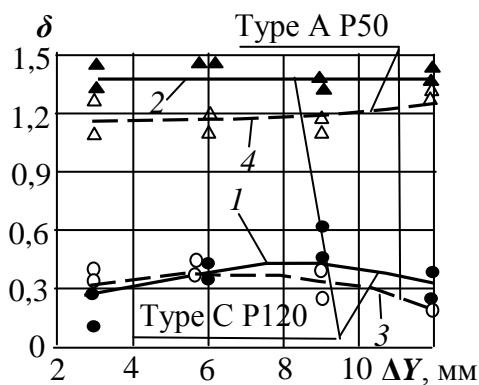
1, 3 – при  $\Delta Y = 3$  мм; 2, 4 – при  $\Delta Y = 9$  мм.  
**Рисунок 4.26 –** Зависимость параметра  $Z_k$  от угла  $\beta$  (В95пчТ2)



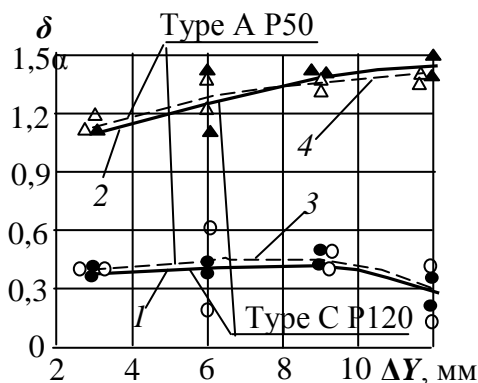
1, 3 – при  $\Delta Y = 3$  мм; 2, 4 – при  $\Delta Y = 9$  мм.  
**Рисунок 4.27 –** Зависимость параметра  $Z_k$  от угла  $\beta$  (ВТ20)

Симметричность расположения обработанной кромки  $\delta$  с увеличением деформации щетки практически не меняется. Это видно на рисунке 4.28 и рисунке 4.29.

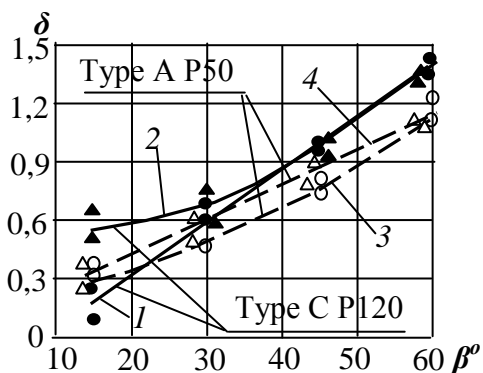
С увеличением угла наклона поверхности  $\beta$  (рисунок 4.30 и рисунок 4.31) отклонение от симметричности  $\delta$  увеличивается и достигает, например, при  $\beta = 60^\circ$  величины  $\delta = 1,452$ .



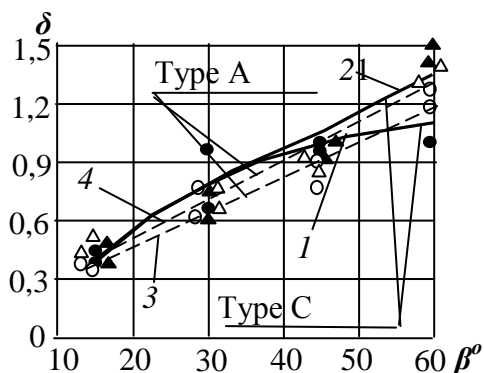
1, 3 – при  $\beta = 15^\circ$ ; 2, 4 – при  $\beta = 60^\circ$ .  
**Рисунок 4.28 –** Зависимость параметра  $\delta$  от деформации щетки  $\Delta Y$  (В95пчТ2)



1, 3 – при  $\beta = 15^\circ$ ; 2, 4 – при  $\beta = 60^\circ$ .  
**Рисунок 4.29 –** Зависимость параметра  $\delta$  от деформации щетки  $\Delta Y$  (ВТ20)



1, 3 – при  $\Delta Y = 3$  мм; 2, 4 – при  $\Delta Y = 9$  мм.  
**Рисунок 4.30 –** Зависимость параметра  $\delta$  от угла  $\beta$  (В95пчТ2)



1, 3 – при  $\Delta Y = 3$  мм; 2, 4 – при  $\Delta Y = 9$  мм.  
**Рисунок 4.31 –** Зависимость параметра  $\delta$  от угла  $\beta$  (ВТ20)

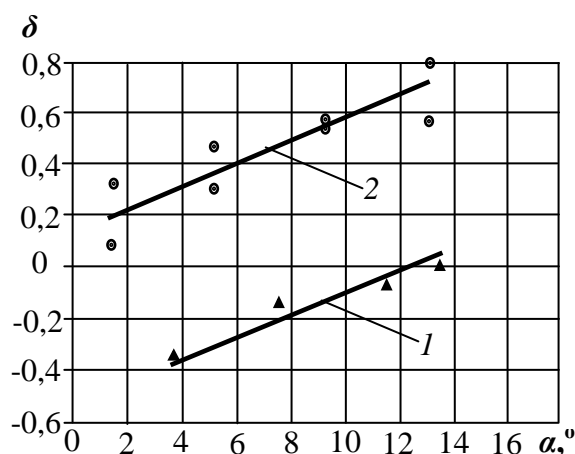
В самолетостроении по ОСТ 1.000.22-80 предусмотрено скругление кромок на деталях 0,5 мм с допустимыми отклонениями  $\pm 0,2$  мм. По ГОСТ 30893.1-2002 (ИСО 2768-1-89) предусмотрены предельные отклонения притупленных кромок (наружных радиусов скругления и высот фасок) для точного ( $f$ ) и среднего ( $m$ ) классов точности –  $\pm 0,2$  мм;

В переводе на относительную величину допустимый показатель  $\delta$ , вычисляемый по выражению (4.18), равен:  $\delta = \frac{X-Y}{Z_k} = \frac{0,4}{0,5} = 0,8$ .

Поэтому для ряда углов наклона обрабатываемой кромки  $\beta$  значения  $\delta$  являются недопустимыми.

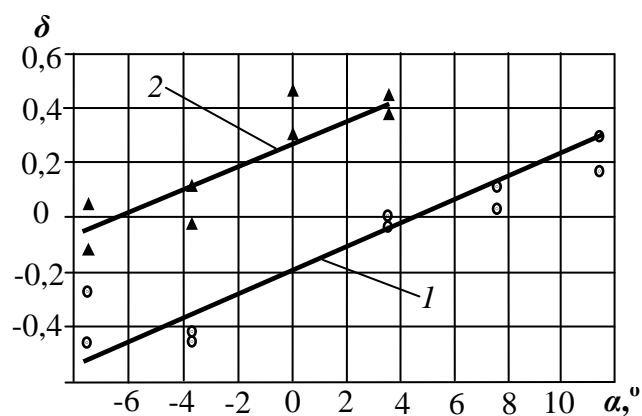
Эта погрешность связана с величиной угла расположения щетки относительно обрабатываемой кромки  $\alpha$  (см. рисунок 4.23).

В результате экспериментальных исследований установлены зависимости показателя  $\delta$  от угла  $\alpha$  для обрабатываемых материалов В95пчТ2 и ВТ20 при обработке с  $\beta = 0$  щетками ВВ-ZB-Type C P120 и ВВ-ZB-Type A P50, которые приведены на рисунке 4.32 и рисунке 4.33.



1 – ВВ-ZB Type C P120  
при  $\Delta Y=4$  мм,  $S=13$  мм/мин;  
2 – ВВ-ZB Type A P50 при  $\Delta Y=2$  мм,  
 $S=82$  мм/мин.

**Рисунок 4.32 – Зависимость  $\delta$  от угла  $\alpha$  (материал В95пчТ2)  $V=754$  м/мин для щеток**



1 – ВВ-ZB Type C P120;  
2 – ВВ-ZB Type A P50.

**Рисунок 4.33 – Зависимости  $\delta$  от угла  $\alpha$  (материал ВТ20) при  $V=754$  м/мин,  $\Delta Y=4$  мм,  $S=33$  мм/мин для щеток**

В результате статистической обработки экспериментальных данных по методике, изложенной в п. 2.5, получена зависимость  $\delta$  от деформации щетки  $\Delta Y$  и углов  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\delta = a_1 \alpha^2 + a_2 \beta^2 + a_3 \Delta Y^2 + a_4 \alpha + a_5 \beta + a_6 \Delta Y + a_7 \beta \cdot \alpha + a_8 \Delta Y \cdot \alpha + a_9 \Delta Y \cdot \beta + a_{10} \beta \cdot \alpha \cdot \Delta Y + a_{11}. \quad (4.25)$$

Значения коэффициентов и свободного члена приведены в таблице 4.19.

Таблица 4.19 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (4.25)

Коэффициент и свобод. член	Щетка ВВ-ZB Type C P120		Щетка ВВ-ZB Type A P50	
	В95ПчТ2	ВТ20	В95ПчТ2	ВТ20
$a_1$	$1,524 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
$a_2$	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$-5 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$
$a_3$	$5,35 \cdot 10^{-3}$	$-6,676 \cdot 10^{-7}$	-0,017	$8 \cdot 10^{-3}$
$a_4$	$7,813 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$1,92 \cdot 10^{-4}$
$a_5$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,46 \cdot 10^{-3}$	$2,46 \cdot 10^{-3}$
$a_6$	0,022526	$-4,316 \cdot 10^{-4}$	-0,035	$-3,453 \cdot 10^{-3}$
$a_7$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
$a_8$	$1,516 \cdot 10^{-3}$	$-1,036 \cdot 10^{-4}$	$9,16 \cdot 10^{-4}$	$-1,969 \cdot 10^{-4}$
$a_9$	$3,328 \cdot 10^{-5}$	$3,328 \cdot 10^{-5}$	$3,328 \cdot 10^{-5}$	$3,328 \cdot 10^{-5}$
$a_{10}$	$2,702 \cdot 10^{-6}$	$2,702 \cdot 10^{-6}$	$2,702 \cdot 10^{-6}$	$2,702 \cdot 10^{-6}$
$a_{11}$	-2,44	-2	-1,05	-1,02

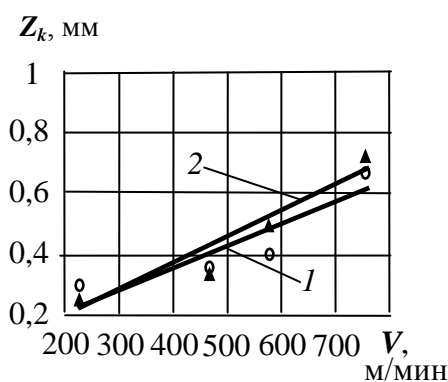
Оптимальным значением является  $\delta = 0$ . Для получения этого значения необходимо по уравнению (4.25) (при заданном  $\Delta Y$  и  $\delta = 0$ ) определить угол  $\alpha$  по формуле:

$$\alpha = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a_1 \cdot c}}{2a_1}, \quad (4.26)$$

где  $b = a_4 + a_7 \cdot \beta + a_8 \cdot \Delta Y + a_{10} \cdot \beta \cdot \Delta Y$ ;

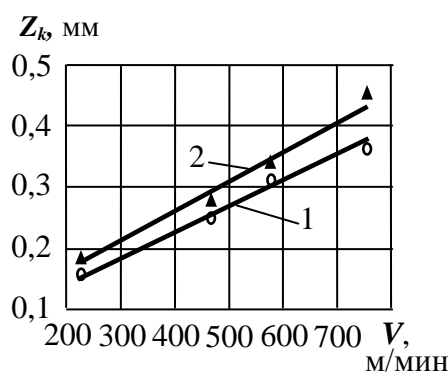
$c = a_2 \cdot \beta^2 + a_3 \cdot (\Delta Y)^2 + a_5 \cdot \beta + a_6 \cdot \Delta Y + a_9 \cdot \beta \cdot \Delta Y + a_{11} - \delta$ .

Дополнительно к зависимостям  $Z_k = f(\Delta Y, \beta)$ , рассмотренным выше, исследовано влияние скорости резания  $V$  и подачи  $S$  на производительность формирования кромки  $Z_k$  при  $\beta = 0$ . Результаты представлены на рисунках 4.34–4.37.



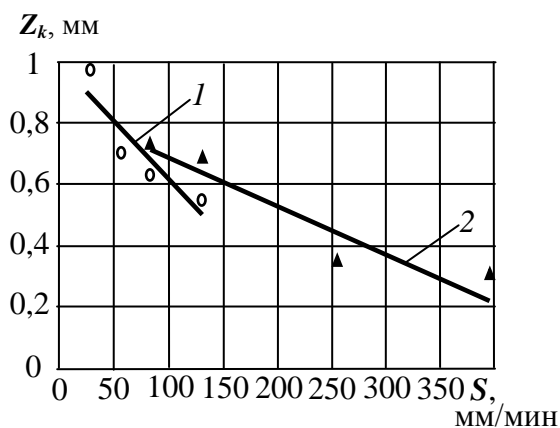
1 – ВВ-ZB Type C P120 при  $\alpha=6,7^\circ$ ;  
 $\Delta Y=4$  мм;  $S=13$  мм/мин;  
 2 – ВВ-ZB Type A P50 при  $\alpha=0^\circ$ ;  $\Delta Y=2$  мм;  
 $S=82$  мм/мин.

Рисунок 4.34 – Зависимости  $Z_k$  от скорости резания  $V$  (материал В95пчТ2)



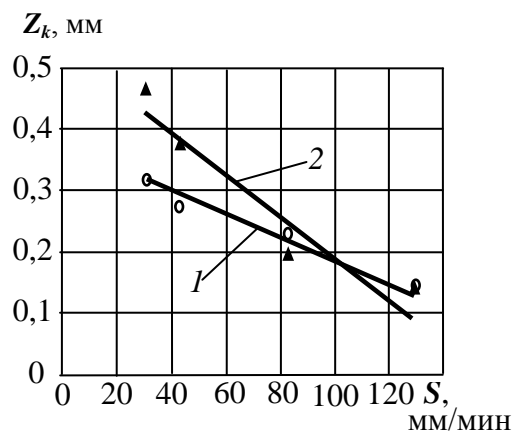
1 – ВВ-ZB Type C P120 при  $\alpha=6,7^\circ$ ;  
 $\Delta Y=4$  мм, 2 – ВВ-ZB Type A P50  
 при  $\alpha = -3,823^\circ$ ;  $\Delta Y=4$  мм.

Рисунок 4.35 – Зависимости  $Z_k$  от скорости резания  $V$  (материал ВТ20) при  $S=33$  мм/мин для щеток



1 – ВВ-ZB Type C P120 при  $\alpha=6,7^\circ$ ,  $\Delta Y=4$  мм; 2 – ВВ-ZB Type A P50 при  $\alpha=0^\circ$ ,  $\Delta Y=2$  мм.

**Рисунок 4.36 – Зависимости  $Z_k$  от подачи  $S$  (материал В95ПчТ2) при  $V=754$  м/мин для щеток**



1 – ВВ-ZB Type C P120 при  $\alpha=6,7^\circ$ ,  $\Delta Y=4$  мм; 2 – ВВ-ZB Type A P50 при  $\alpha = -3,823^\circ$ ,  $\Delta Y=4$  мм.

**Рисунок 4.37 – Зависимости  $Z_k$  от подачи  $S$  (материал ВТ20) при  $V=754$  м/мин для щеток**

В результате статистической обработки экспериментальных данных по методике, изложенной в п. 2.5, получена зависимость среднего размера кромки  $Z_k$  от всех режимных параметров обработки – деформации щетки  $\Delta Y$ , скорости  $V$ , подачи  $S$  и угла наклона  $\beta$ :

$$Z_k = b_1 \cdot \Delta Y^2 + b_2 \cdot V^2 + b_3 \cdot S^2 + b_4 \cdot \beta^2 + b_5 \cdot \Delta Y + b_6 \cdot V + b_7 \cdot S + b_8 \cdot \beta + b_9 \cdot \Delta Y \cdot V + b_{10} \cdot \Delta Y \cdot S + b_{11} \cdot \Delta Y \cdot \beta + b_{12} \cdot V \cdot S + b_{13} \cdot V \cdot \beta + b_{14} \cdot S \cdot \beta + b_{15} \cdot \Delta Y \cdot V \cdot S + b_{16} \cdot \Delta Y \cdot V \cdot \beta + b_{17} \cdot S \cdot V \cdot \beta + b_{18} \cdot \Delta Y \cdot V \cdot S \cdot \beta + b_{19}. \quad (4.27)$$

Значения коэффициентов и свободного члена (4.27) приведены в таблице 4.20.

**Таблица 4.20 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (4.27)**

Коэффициент и свобод. член	Щетка ВВ-ZB Type C P120		Щетка ВВ-ZB Type A P50	
	В95ПчТ2	ВТ20	В95ПчТ2	ВТ20
$b_1$	$4,857 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$4,857 \cdot 10^{-3}$	$-5,5 \cdot 10^{-4}$
$b_2$	$7,929 \cdot 10^{-7}$	$5,286 \cdot 10^{-7}$	$7,929 \cdot 10^{-7}$	$4,955 \cdot 10^{-7}$
$b_3$	$-9 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$-9 \cdot 10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^{-5}$
$b_4$	$-2,743 \cdot 10^{-5}$	$-1,829 \cdot 10^{-5}$	$-2,743 \cdot 10^{-5}$	$-1,714 \cdot 10^{-5}$
$b_5$	$3,514 \cdot 10^{-5}$	$2,343 \cdot 10^{-5}$	$3,514 \cdot 10^{-5}$	0,0995
$b_6$	$-1,016 \cdot 10^{-7}$	$-6,771 \cdot 10^{-8}$	$-1,016 \cdot 10^{-7}$	$-6,347 \cdot 10^{-8}$
$b_7$	$2,857 \cdot 10^{-7}$	-0,0123	$2,857 \cdot 10^{-7}$	$-9 \cdot 10^{-3}$
$b_8$	$-5,18 \cdot 10^{-3}$	$-3,453 \cdot 10^{-3}$	$-5,18 \cdot 10^{-3}$	$-3,238 \cdot 10^{-3}$
$b_9$	$4,754 \cdot 10^{-7}$	$3,17 \cdot 10^{-7}$	$4,754 \cdot 10^{-7}$	$2,971 \cdot 10^{-7}$
$b_{10}$	$3,86 \cdot 10^{-7}$	$-2,702 \cdot 10^{-4}$	$3,86 \cdot 10^{-7}$	$-9 \cdot 10^{-4}$
$b_{11}$	$4,286 \cdot 10^{-10}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$	$4,286 \cdot 10^{-10}$	$2,679 \cdot 10^{-10}$
$b_{12}$	$4,857 \cdot 10^{-8}$	$-4,857 \cdot 10^{-7}$	$4,857 \cdot 10^{-8}$	$3,036 \cdot 10^{-8}$
$b_{13}$	$3,514 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$3,514 \cdot 10^{-8}$	$2,196 \cdot 10^{-8}$
$b_{14}$	$-9,537 \cdot 10^{-9}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$	$-9,537 \cdot 10^{-9}$	$-5,961 \cdot 10^{-9}$
$b_{15}$	$2,743 \cdot 10^{-8}$	$1,829 \cdot 10^{-8}$	$2,743 \cdot 10^{-8}$	$1,714 \cdot 10^{-8}$
$b_{16}$	$3,514 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$3,514 \cdot 10^{-8}$	$2,196 \cdot 10^{-8}$
$b_{17}$	$-9,866 \cdot 10^{-9}$	$-6,577 \cdot 10^{-9}$	$-9,866 \cdot 10^{-9}$	$-6,166 \cdot 10^{-9}$
$b_{18}$	$4,286 \cdot 10^{-11}$	$2,857 \cdot 10^{-11}$	$4,286 \cdot 10^{-11}$	$2,679 \cdot 10^{-11}$
$b_{19}$	0,32	0,39	0,4	0,12

$$\text{При заданных } Z_k, \Delta Y, V \text{ и } \beta \text{ подача } S \text{ определяется по формуле: } S = \frac{-d + \sqrt{d^2 - 4b_3 \cdot f}}{2b_3}, \quad (4.28)$$

где  $d = b_7 + b_{10} \cdot \Delta Y + b_{12} \cdot V + b_{14} \cdot \beta + b_{15} \cdot \Delta Y \cdot V + b_{17} \cdot V \cdot \beta + b_{18} \cdot \Delta Y \cdot V \cdot \beta$ ;

$$f = b_1 \cdot (\Delta Y)^2 + b_2 \cdot V^2 + b_4 \cdot \beta^2 + b_5 \cdot \Delta Y + b_6 \cdot V + b_8 \cdot \beta + b_9 \cdot \Delta Y \cdot V + b_{11} \cdot \Delta Y \cdot \beta + b_{13} \cdot V \cdot \beta + b_{16} \cdot \Delta Y \cdot V \cdot \beta + b_{19} \cdot Z_k.$$

### Технологические рекомендации

Для получения одинаковых по величине размеров кромок  $Z_k$  как на горизонтальных участках длинномерной детали, так и на наклонных с углом  $\beta$ , назначение режимов обработки следует производить в следующей последовательности:

1. Назначаются скорость резания  $V$  и деформация щетки  $\Delta Y$ .
2. По формуле (4.26) при  $\beta = 0$  определяется угол  $\alpha$ .
3. По формуле (4.28) при  $\beta = 0$  определяется подача  $S$  для горизонтального участка для получения заданного по чертежу размера  $Z_k$ .
4. По формуле (4.26) при заданном по чертежу  $\beta$  и принятой для наклонной поверхности деформации щетки  $\Delta Y$  определяется угол  $\alpha$ .
5. По формуле (4.28) при заданных  $Z_k$  и  $\beta$  определяется подача вдоль наклонной поверхности  $S$ .
6. Определяются горизонтальная  $S_\Gamma$  и вертикальная  $S_B$  составляющие подачи по формулам:  $S_\Gamma = S \cdot \cos\beta$ ,  $S_B = S \cdot \sin\beta$ .

В таблицах 4.21 (для материала В95пчТ2) и 4.22 (для материала ВТ20) приведены режимы обработки, которые рекомендуются для получения кромок с размером  $Z_k = 0,5$  мм.

**Таблица 4.21 – Рекомендуемые режимы обработки материала В95пчТ2**

для достижения  $Z_k = 0,5$  мм,  $n = 1600$  об/мин ( $V = 754$  м/мин для щетки  $\varnothing 150$  мм)

$\beta^\circ$	$\Delta Y$ , мм	ВВ-ZB-Туре С Р120				ВВ-ZB-Туре А Р50			
		$\alpha^\circ$	$S$ , мм/мин	$S_\Gamma$ , мм/мин	$S_B$ , мм/мин	$\alpha^\circ$	$S$ , мм/мин	$S_\Gamma$ , мм/мин	$S_B$ , мм/мин
0	4	101,479	204,04	-	-	85,017	225,41	-	-
	5	95,631	217,3	-	-	88,525	237,55	-	-
15°	4	92,665	173,22	167,32	44,83	74,675	197,29	190,57	51,06
	5	87,138	188,2	181,79	48,71	78,358	210,69	203,51	24,53
30°	5	78,248	151,72	131,39	75,86	68,089	178	154,15	89
	6	72,988	171,29	148,34	85,64	72,612	195,16	169,01	97,58
	7	67,665	191,92	166,21	95,96	77,642	213,65	185,03	106,82
45°	5	68,978	102	72,12	72,12	57,722	136,33	96,4	96,4
	6	64,069	127,7	90,3	90,3	62,442	157,05	111,05	111,05
	7	59,109	153,05	108,22	108,22	67,632	178,64	126,32	126,32
60°	6	54,795	60,56	30,28	52,45	52,205	105,78	52,89	91,61
	7	50,205	99,86	49,93	86,48	57,578	133,87	66,93	115,93

**Таблица 4.22 – Рекомендуемые режимы обработки материала ВТ20  
при  $Z_k = 0,5$  мм,  $n = 1600$  об/мин ( $V = 754$  м/мин для щетки  $\varnothing 150$  мм)**

$\beta^\circ$	$\Delta Y$ , мм	ВВ-ZB-Туре С Р120				ВВ-ZB-Туре А Р50			
		$\alpha^\circ$	$S$ , мм/мин	$S_\Gamma$ мм/мин	$S_B$ мм/мин	$\alpha^\circ$	$S$ , мм/мин	$S_\Gamma$ мм/мин	$S_B$ мм/мин
0	4	94,065	25,235	-	-	82,595	27,026	-	-
	5	94,311	30,749	-	-	80,22	34,499	-	-
15°	4	87,14	19,891	19,213	5,148	69,909	21,439	20,709	5,549
	5	87,271	25,122	24,267	6,502	67,219	28,846	27,863	7,466
30°	5	80,835	19,24	16,662	9,62	55,626	22,924	19,853	11,462
	6	80,864	25,568	22,142	12,784	51,774	29,593	25,628	14,796
	7	80,893	33,506	29,017	16,753	46,789	35,587	30,819	17,793
45°	5	74,985	13,157	9,303	9,303	45,435	16,792	11,873	11,873
	6	74,929	19,134	13,53	13,53	41,485	23,46	16,589	16,589
	7	74,873	26,53	18,759	18,759	36,43	29,504	20,863	20,863
60°	5	69,699	6,917	3,458	5,99	36,591	10,492	5,246	9,086
	6	69,57	12,588	6,294	10,902	32,654	17,16	8,58	14,861
	7	69,444	19,526	9,763	16,91	27,686	23,249	11,624	20,134
	9	69,187	38,388	19,194	33,245	13,445	33,752	16,876	29,23

Из приведенных данных видно, что при обработке горизонтальных поверхностей ( $\beta = 0$ ) подача  $S$  больше, чем такая же подача при обработке наклонных поверхностей –  $S_\Gamma$ . Для обеспечения требуемого размера кромки  $Z_k = 0,5$  мм потребуется перенастройка продольной подачи  $S$  на  $S_\Gamma$ , либо увеличение деформации щетки  $\Delta Y$  в соответствии с уравнением (4.27).

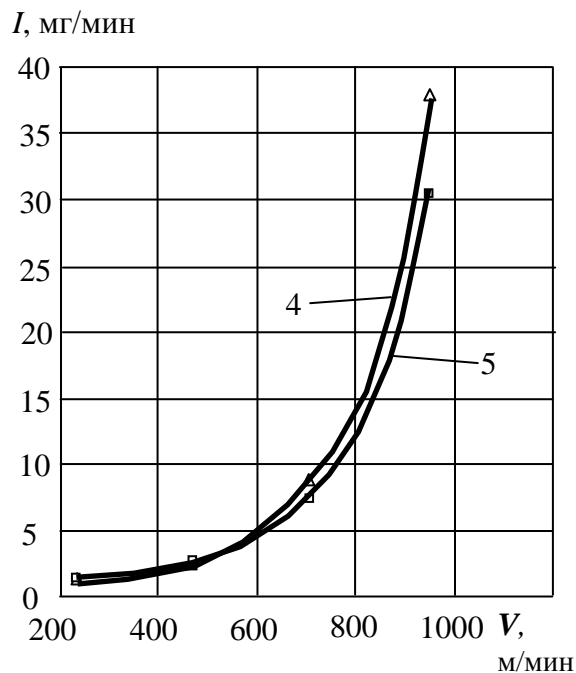
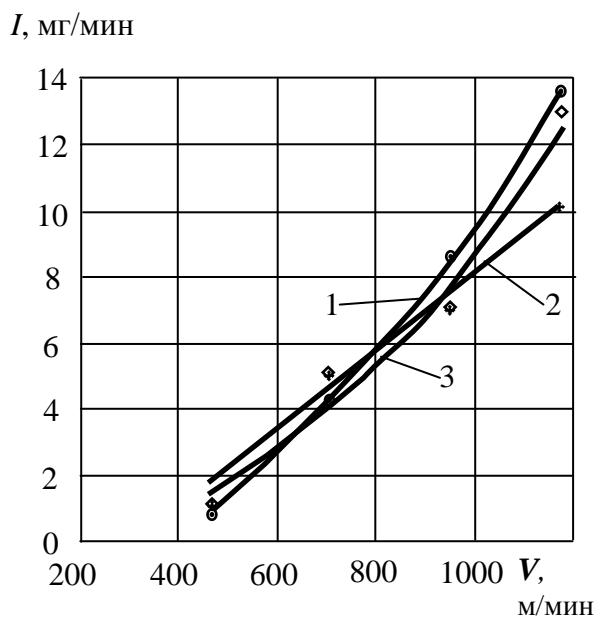
Как показали проведенные исследования, из всех использованных щеток оптимальными с точки зрения обеспечения наибольшей производительности процесса обработки и обеспечения шероховатости обработанной поверхности, являются щетки ВВ-ZB-Туре С Р120 с изогнутыми ворсинами и ВВ-ZB-Туре А Р50 с прямыми ворсинами.

#### **4.1.6 Износ радиальных полимерно-абразивных щеток при обработке кромок**

Информация об интенсивности износа щеток необходима при оптимизации процесса обработки кромок по критерию «минимум себестоимости операции». Стоимость израсходованного инструмента учитывается при реализации программы оптимизации.

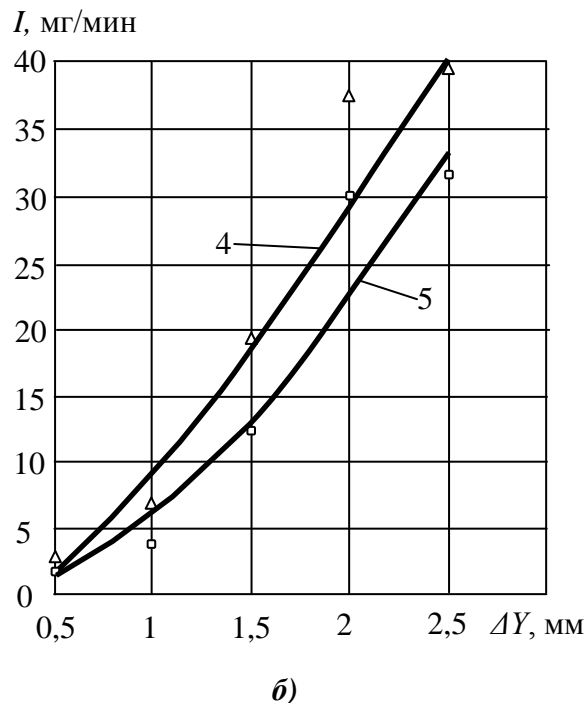
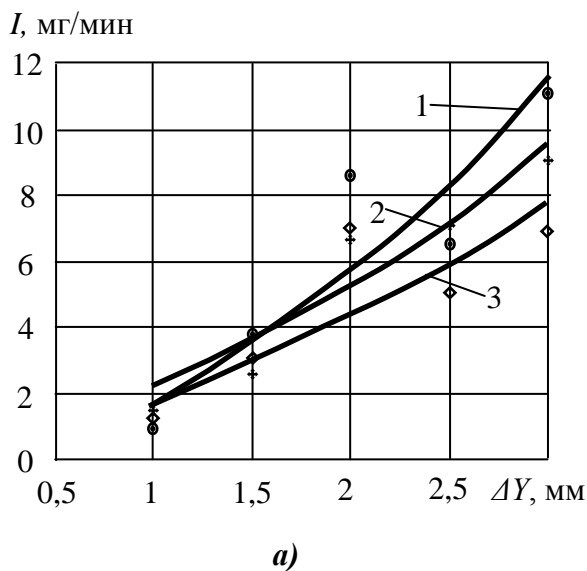
Износ радиальных щеток исследовался при обработке кромок на универсально-фрезерном станке Deckel Maho DMC 635V (Германия) (рисунок 2.17). Величина износа определялась взвешиванием щеток до и после обработки. Взвешивание производилось на электронных аналитических весах Ohaus DV214C (см. п. 2.4.1). При этом после каждой обработки инструменты подвергались мойке при помощи высокоэффективных моющих средств и сушке при температуре 20°С в течение минимум 12 часов. Эти меры необходимы с целью механического удаления стружки и пыли, неизбежно остающихся на инструментах после обработки.





а) 1 – ВВ-ZB Type C P120; 2 – ВВ-ZB Type C P220; 3 – ВВ-ZB Type C P400 при деформации  $\Delta Y = 2$  мм,  $A = 10$  мм ( $\alpha = 7,662^\circ$ ); б) 4 – ВВ-ZB Type A P36; 5 – ВВ-ZB Type A P50 при деформации  $\Delta Y = 2$  мм,  $A = 0$  мм ( $\alpha = 0^\circ$ ).

**Рисунок 4.38 – Зависимость износа инструмента за 1 мин работы от скорости резания  $V$  для щеток**



а) 1 – ВВ-ZB Type C P120; 2 – ВВ-ZB Type C P220; 3 – ВВ-ZB Type C P400 при скорости резания  $V = 942,48$  м/мин,  $A = 10$  мм ( $\alpha = 7,662^\circ$ ); б) 4 – ВВ-ZB Type A P36; 5 – ВВ-ZB Type A P50 при скорости резания  $V = 942,48$  м/мин,  $A = 0$  мм ( $\alpha = 0^\circ$ ).

**Рисунок 4.39 – Зависимость износа инструмента за 1 мин работы от деформации инструмента  $\Delta Y$  для щеток**

В результате экспериментальных исследований получены зависимости интенсивности износа ворсин радиальных щеток ВВ-ZB Type C P120, ВВ-ZB Type C P220, ВВ-ZB Type C P400 (рисунок 4.38, а) и щеток ВВ-ZB Type A P36, ВВ-ZB Type A P50 (рисунок 4.38, б) от скорости резания  $V$ .

Зависимости износа от деформации щетки  $\Delta Y$  приведены на рисунке 4.39, а – для щеток ВВ-ZB Type C P120, ВВ-ZB Type C P220, ВВ-ZB Type C P400 и на рисунке 4.39, б – для щеток ВВ-ZB Type A P36, ВВ-ZB Type A P50.

Рост интенсивности износа объясняется увеличением сил резания, как при изменении скорости резания, так и деформации щетки.

Заключение о значимости влияния рассматриваемого фактора  $\Delta Y$  и  $V$  на параметр  $I$  получено с использованием критерия Фишера (см. п. 2.5.2) и представлено в таблице 4.23.  $F_{0,95}$  – критерий Фишера при доверительной вероятности 0,95. Этот критерий при степенях свободы  $f_1 = k - 1 = 3$  и  $f_2 = k(n - 1) = 8$  по справочным данным [199] равен  $F_{0,95} = 4,1$ .

Доверительные границы определены как  $\pm S_0 \cdot t$ , где  $t$  – квантиль Стьюдента. При количестве степеней свободы 11:  $t = 2,20$ .

Полученные экспериментальные зависимости, согласно методике, изложенной в п. 2.5, были аппроксимированы формулой вида:

$$I = a_1 \cdot V^2 + a_2 \cdot \Delta Y^2 + a_3 \cdot V + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot V \cdot \Delta Y + a_6, \quad (4.29)$$

где  $V$  – скорость резания, м/мин;  $\Delta Y$  – деформация круга, мм.

**Таблица 4.23 – Результаты дисперсионного анализа зависимостей величины  $I$  от скорости резания  $V$  и деформации инструмента  $\Delta Y$**

Марка щетки	Функция	$S_A^2$ , (мг/мин) <sup>2</sup>	$S_0^2$ , (мг/мин) <sup>2</sup>	$F=S_A^2/S_0^2$	Значимость влияния фактора	Доверительные границы $S_0 \cdot t$ , мг/мин
ВВ-ZB Type C P120	$I = f(\Delta Y)$	63,886	0,03313	1928,627	значимо	$\pm 0,4004$
	$I = f(V)$	91,626	0,01979	4629,54	значимо	$\pm 0,3095$
ВВ-ZB Type C P220	$I = f(\Delta Y)$	28,598	0,02417	1183,356	значимо	$\pm 0,342$
	$I = f(V)$	44,941	0,04313	1042,105	значимо	$\pm 0,457$
ВВ-ZB Type C P400	$I = f(\Delta Y)$	19,5075	0,0175	1114,714	значимо	$\pm 0,291$
	$I = f(V)$	70,696	0,0475	1488,327	значимо	$\pm 0,4795$
ВВ-ZB Type A P36	$I = f(\Delta Y)$	857,603	0,1725	4971,614	значимо	$\pm 0,91373$
	$I = f(V)$	852,988	0,15417	5532,894	значимо	$\pm 0,86381$
ВВ-ZB Type A P50	$I = f(\Delta Y)$	621,434	0,17583	3534,224	значимо	$\pm 0,9225$
	$I = f(V)$	550,832	0,15417	3572,966	значимо	$\pm 0,86381$

Значения коэффициентов  $a_{1-5}$  и свободного члена  $a_6$  уравнения (4.29) приведены в таблице 4.24.

Таблица 4.24 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (4.29)

Коэффициент	Щетка ВВ-ZB Type C P120	Щетка ВВ-ZB Type C P220	Щетка ВВ-ZB Type C P400	Щетка ВВ-ZB Type A P36	Щетка ВВ-ZB Type A P50
$a_1$	$7,2 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$6,667 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
$a_2$	-0,99	-0,55	0,2439	4,1803	2,2171
$a_3$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$-5 \cdot 10^{-3}$	-0,0391	-0,0203
$a_4$	7,8674	5,2	1,2	2,0833	8,365
$a_5$	$8 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$8,333 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
$a_6$	-16,24	-10,04	-2,94	-14,5	-22,5

При эксплуатации радиальных полимерно-абразивных щеток, для оценки изношенности их ворсин, необходимо знать длину изношенной части ворсины. Поэтому, полученные по результатам экспериментального исследования значения износа щеток в единицах массы, необходимо перевести в длину изношенной части ворсины  $l_{\text{изн}}$ .

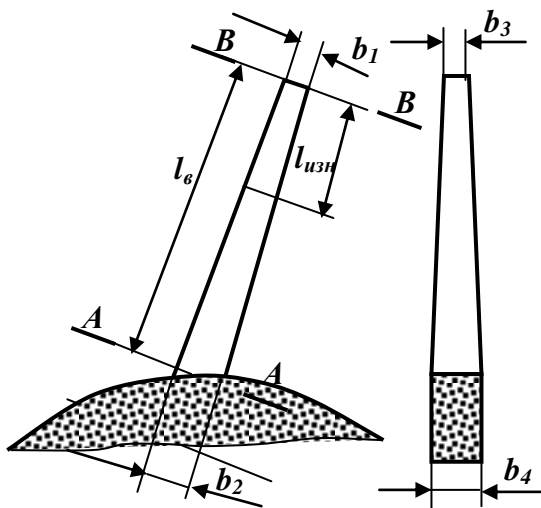


Рисунок 4.40 – Схема к расчету длины изношенной ворсины

$l_1$ ,  $l_2$  – длина изношенной части ворсины в начале и в конце процесса обработки, мм.;  
 $\gamma_B$  – плотность материала ворсины, мг/мм<sup>3</sup>.

$F_1$ ,  $F_2$  – площадь поперечного сечения ворсины в начале и в конце процесса обработки, мм<sup>2</sup>:

$$F_1 = \frac{F_{AA} - F_{BB}}{l_B} \cdot l_1; \quad (4.32)$$

$$F_2 = \frac{F_{AA} - F_{BB}}{l_B} \cdot l_2; \quad (4.33)$$

где  $l_1$ ,  $l_2$  – длина изношенной части ворсины в начале и в конце процесса обработки, мм.:

$$l_2 = l_1 + l_{\text{изн}}. \quad (4.34)$$

Решая совместно уравнения (4.30), (4.32), (4.33) и (4.34) получаем:

При заданных размерах (рисунок 4.40) толщины ворсины  $b_1 - b_4$  и рассчитанных площадей поперечных сечений на вершине ворсины  $F_{BB}$  и в основании  $F_{AA}$ , длина изношенной части ворсины определится по формуле (значения  $b_1 - b_4$ ,  $F_{BB}$  и  $F_{AA}$  приведены в таблице 4.25):

$$l_{\text{изн}} = \frac{m_{\text{изн}}}{\gamma_B \left( \frac{F_2 + F_1}{2} \right)}, \quad (4.30)$$

где  $m_{\text{изн}}$  – масса изношенной ворсины, мг.:

$$m_{\text{изн}} = \frac{I \cdot T_{\text{изн}}}{N_B}, \quad (4.31)$$

$I$  – износ по формуле (4.29), мг/мин;

$T_{\text{изн}}$  – продолжительность работы щетки, мин;  $N_B$  –

$$l_{\text{изн}} = \frac{-K_{\text{дл}} \cdot l_1 \pm \sqrt{(K_{\text{дл}} \cdot l_1)^2 + 2K_{\text{дл}} \cdot \frac{m_{\text{изн}}}{\gamma_{\text{в}}}}}{K_{\text{дл}}}, \quad (4.35)$$

где  $K_{\text{дл}}$  – параметр удельного изменения длины ворсины, мм.:  $K_{\text{дл}} = \frac{F_{\text{AA}} - F_{\text{BB}}}{l_{\text{в}}}$ . (4.36)

**Таблица 4.25 – Размеры ворсин щеток**

Щетки	$l$ , мм	$b_1$ , мм	$b_2$ , мм	$b_3$ , мм	$b_4$ , мм	$F_{\text{BB}}$ , мм <sup>2</sup>	$S_{\text{AA}}$ , мм <sup>2</sup>
ВВ-ZB Type C	32	0,9	1,8	1,0	1,5	0,9	2,7
ВВ-ZB Type A	33	1,8	2,5	1,5	1,5	2,7	3,75

Для удобства практического применения уравнения (4.35), предложены таблицы Б.1 и Б.2 (см. приложение Б) с рассчитанными по (4.35) значениями  $l_{\text{изн}}$  в зависимости от состояния ворсин щетки по  $l_1$ .

Также, по данным этих таблиц, построены графики (рисунки Б.6 и Б.7 приложения Б).

Для того, чтобы воспользоваться таблицами Б.6 и Б.7 приложения Б, а также графиками, приведенными в приложении Б на рисунках Б.6 и Б.7, необходимо по уравнению (4.29) определить износ щетки  $I$ , затем определить продолжительность ее работы и по формуле (4.31) рассчитать массу изношенной ворсины. При этом  $l_1$  фиксируется по фактическому состоянию изношенности щетки.

В связи с износом инструмента, деформация щетки  $\Delta Y$  постепенно уменьшается, вследствие чего интенсивность съема материала падает. Поэтому при длительном процессе обработки необходимо периодически корректировать натяг инструмента на величину изношенной части  $l_{\text{изн}}$ , определяемой по формуле (4.35).

Время обработки, в течение которого наступает износ  $l_{\text{изн}}$  (в мин), определится из уравнения (4.31):  $T_{\text{изн}} = \frac{m_{\text{изн}} \cdot N_{\text{в}}}{I}$ .

Масса изношенной ворсины  $m_{\text{изн}}$  определится из уравнений (4.30), (4.32), (4.33), (4.34) и (4.36):  $m_{\text{изн}} = l_{\text{изн}} \cdot \gamma_{\text{в}} \cdot \left( \frac{F_1 + F_2}{2} \right) = \frac{\gamma_{\text{в}} \cdot K_{\text{дл}}}{2} \cdot l_{\text{изн}} \cdot (2l_1 + l_{\text{изн}})$ .

Для исследованных щеток время  $T_{\text{изн}}$  (при заданных допустимых значений  $l_{\text{изн}}$ ) в качестве примера приведено в таблице Б.3 приложения Б для наименьшей  $I_{\text{min}}$  (мг/мин) и наибольшей  $I_{\text{max}}$  (мг/мин) возможной интенсивности износа.

## 4.2 Обработка острых кромок эластичными полимерно-абразивными кругами

### 4.2.1 Экспериментальное исследование качества скругления кромок при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами

Для исследования процесса формирования радиусов скругления наряду с полимерно-абразивными щетками (см. п. 4.1), использованы эластичные полимерно-абразивные круги компании 3М: CF-FB-0,5A FIN (см. рисунок 2.7), FS-WL-2SCRS (см. рисунок 2.5), CB-ZS P180 (см. рисунок 2.8), FF-ZS ACRS (см. рисунок 2.9). Основные параметры данных инструментов приведены в таблице 4.26.

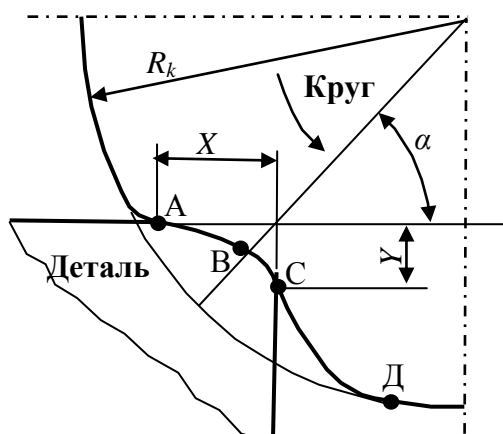
Эксперименты по обработке кромок образцов из алюминиевого сплава В95пчТ2 (см. рисунок 2.13) проводились на универсально-фрезерном станке (см. рисунок 2.17) при частотах вращения круга  $n = 500, 1000, 1250, 1600$  об/мин. Подача вдоль кромок и деформации круга варьировались в пределах, приведенных в таблице 4.26.

В таблице 4.26 приняты следующие обозначения:  $D_k$  – диаметр круга, мм;  $B_k$  – ширина круга, мм;  $d_k$  – диаметр отверстия, мм.

**Таблица 4.26 – Параметры эластичных полимерно-абразивных кругов**

Круг	$D_k$ , мм	$B_k$ , мм	$d_k$ , мм	Абразив	Зернистость Z, мкм	Подача S, мм/мин	Деформация $\Delta Y$ , мм
CF-FB-0,5AFIN	193	50	76,5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45-50	33, 52, 82, 130	3; 3,5; 4; 4,5
FS-WL-2SCRS	147	26	25,4	SiC	~100	104, 130, 160, 200	1,5; 2; 2,5; 3
CB-ZS P180	75	45	-	SiC	80	130, 200, 255, 395	1; 2; 3; 4
FF-ZS ACRS	75	45	-	SiC	~100	130, 200, 255, 395	1; 2; 3; 4

При обработке кромок эластичным полимерно-абразивным кругом на детали формируется поверхность ABC (рисунок 4.41), которая характеризуется неправильной геометрической формой и неравенством размеров X и Y.



**Рисунок 4.41 – Схема формирования скругленной кромки эластичным полимерно-абразивным кругом**

Если бы материал круга обладал идеально упругими свойствами, то при угле  $\alpha = 45^\circ$  размеры X и Y были бы равны. В действительности, материал круга обладает вязкоупругими свойствами со способностью релаксации (см. п. 3.2.1). Для этого случая наиболее близкой является модель тела Максвелла [20]:

$$\sigma + n\dot{\sigma} = \chi\dot{\epsilon},$$

где  $\sigma$  и  $\dot{\sigma}$  – напряжение и скорость изменения напряжения;  $\dot{\epsilon}$  – скорость изменения относительной деформации;  $n$  и  $\chi$  – коэффициенты.

Параметрами, которые характеризуют вязкие свойства, в данном уравнении являются скорость напряжения и скорость деформации. От этих величин зависит положение точки С на кромке детали. При вязком уменьшении деформации контакт круга с кромкой детали прекращается (точка С) раньше, чем произойдет полное восстановление круга (точка Д).

Таким образом, для обеспечения равенства размеров  $X$  и  $Y$ , необходимо выбирать соответствующее значение угла  $\alpha$  (аналогично выбору угла  $\alpha$  при скруглении кромок радиальными полимерно-абразивными щетками – см. п. 4.1.4).

Измерение размеров  $X$ ,  $Y$  и  $r$  выполнялось на большом инструментальном микроскопе с цифровым отсчетным устройством БМИ 1Ц (см. рисунок 2.22) с точностью 1 мкм.

Для проведения исследований влияния режимных параметров обработки на производительность процесса и качество полученных радиусов скругления, необходимо определить ограничительные значения деформации круга ( $\Delta Y$ ) и положения круга относительно обрабатываемой кромки.

Наибольшие значения деформации круга  $\Delta Y$  (см. рисунок 4.11, б) принимали из условий стойкости круга. Для круга CF-FB-0,5AFIN  $\Delta Y$  составило 4,5 мм, для круга FS-WL-2SCRS – 3 мм, для кругов CB-ZS P180 и FF-ZS ACRS – 4 мм. Установлено, что превышение указанной величины приводит к интенсивному износу круга.

#### ***Точность месторасположения (позиционирование) обработанного радиуса $\delta$***

На относительное отклонение от симметричности расположения радиуса закругления  $\delta$  существенное влияние оказывает положение круга относительно обрабатываемой кромки – угол  $\alpha$ .

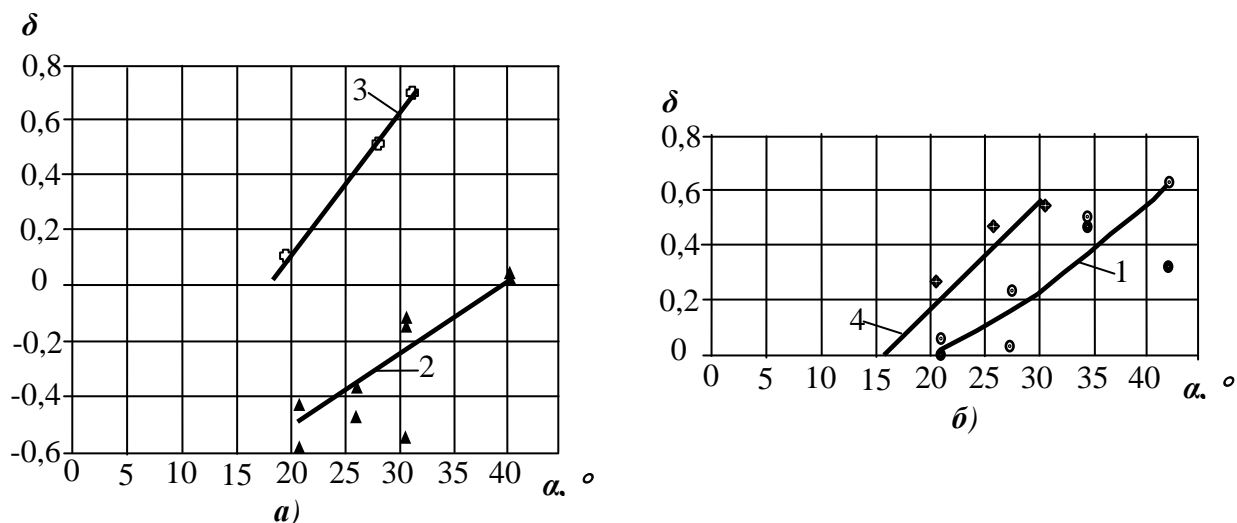
Относительное отклонение от симметричности расположения радиуса закругления  $\delta$  (4.18) зависит от соотношения размеров  $X$  и  $Y$  (см. рисунок 4.11, а). Оптимальное расположение радиуса соответствует  $\delta = 0$ , т. е. равенству размеров  $X$  и  $Y$ . Это достигается путем выбора соответствующего угла  $\alpha$  (см. рисунок 4.11, б).

На рисунке 4.42 приведены зависимости  $\delta$  от угла  $\alpha$ , из которых следует, что при исследованных режимах, для круга CF-FB 0,5A FIN оптимальным является значение  $\alpha = 20^\circ$ , для круга FS-WL 2S CRS –  $\alpha = 40^\circ$ , для кругов CB-ZS P180 и FF-ZS ACRS –  $16^\circ$ .

При увеличении деформации  $\Delta Y$  (рисунок 4.43) круга CF-FB 0,5A FIN значение  $\delta$  увеличивается, для кругов FS-WL 2S CRS, CB-ZS-P180 и FF-ZS ACRS – уменьшается. Это объясняется различием в жесткостных характеристиках исследованных инструментов.

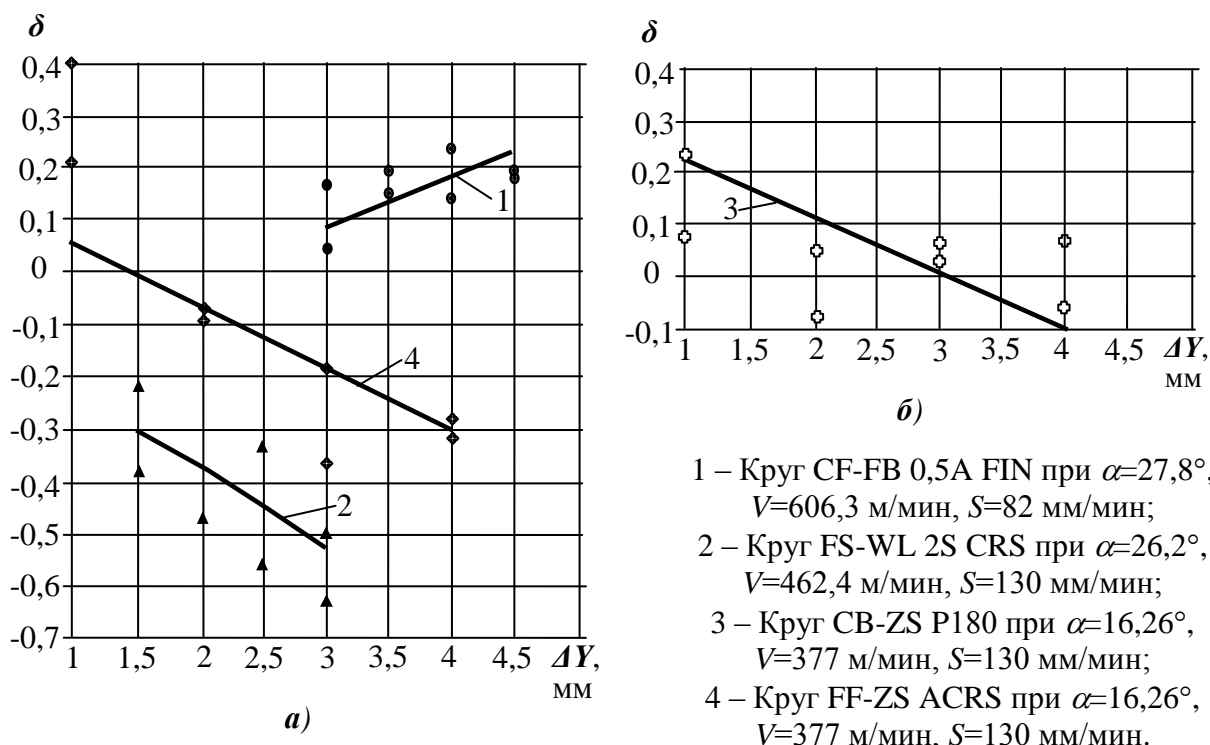
Для маложесткого инструмента CF-FB 0,5A FIN (жесткость  $C_r = 0,0162 \text{ Н/мм}^2 \cdot \text{мм}$ ), ввиду его высокой податливости, увеличение размера  $X$  происходит более интенсивно чем увеличение размера  $Y$ . У более жестких кругов CB-ZS P180, FF-ZS ACRS и FS-WL 2S CRS (жесткость  $C_r =$

0,0993 Н/мм<sup>2</sup>·мм), при малой податливости его материала, рост  $Y$  превышает рост  $X$ . В таблицах 4.27 и 4.28 представлены экспериментальные данные значений параметра  $\delta$ , полученные при изменении подачи (таблица 4.27) и скорости резания (таблица 4.28)



- 1 – Круг CF-FB 0,5A FIN при  $\Delta Y=4$  мм,  $V=606,3$  м/мин,  $S=82$  мм/мин;
- 2 – Круг FS-WL 2S CRS при  $\Delta Y=2$  мм,  $V=462,4$  м/мин,  $S=130$  мм/мин;
- 3 – Круг CB-ZS P180 при  $\Delta Y=2$  мм,  $V=377$  м/мин,  $S=130$  мм/мин;
- 4 – Круг FF-ZS ACRS при  $\Delta Y=2$  мм,  $V=377$  м/мин,  $S=255$  мм/мин.

**Рисунок 4.42 – Зависимости относительного отклонения от симметричности расположения радиуса скругления  $\delta$  от угла  $\alpha$  для инструментов**



- 1 – Круг CF-FB 0,5A FIN при  $\alpha=27,8^\circ$ ,  $V=606,3$  м/мин,  $S=82$  мм/мин;
- 2 – Круг FS-WL 2S CRS при  $\alpha=26,2^\circ$ ,  $V=462,4$  м/мин,  $S=130$  мм/мин;
- 3 – Круг CB-ZS P180 при  $\alpha=16,26^\circ$ ,  $V=377$  м/мин,  $S=130$  мм/мин;
- 4 – Круг FF-ZS ACRS при  $\alpha=16,26^\circ$ ,  $V=377$  м/мин,  $S=130$  мм/мин.

**Рисунок 4.43 – Зависимости относительного отклонения от симметричности расположения радиуса скругления  $\delta$  от деформации  $\Delta Y$  для инструментов**

**Таблица 4.27 – Экспериментальные данные изменения параметров  $\delta$  и  $k$  в зависимости от подачи  $S$**

Инструмент	$\alpha, ^\circ$	$\Delta Y, \text{мм}$	$V, \text{м/мин}$	$S, \text{мм/мин}$	$\delta$	$k$
Круг CF-FB-0,5AFIN	27,8	4	606,3	33	0,06; 0,15	-0,14; 0,09
				52	0,26; 0,34	-0,05; 0,1
				82	0,01; 0,22	0,13; 0,17
				130	-0,01; 0,39	-0,08; 0,13
Круг FS-WL-2SCRS	26,2	2	462,4	104	-0,42; -0,37	0,02; 0,16
				130	-0,04; -0,4	0,19; 0,23
				160	-0,22; -0,51	0,11; 0,2
				200	-0,38; -0,25	0,18; 0,06
Круг CB-ZS-P180	16,26	2	377	130	-0,02; -0,11	0,12; 0,18
				200	-0,26; -0,35	0,04; 0,09
				255	0,01; 0,03	0,12; 0,18
				395	0,06; 0,15	0,15; 0,21
Круг FF-ZSACRS	16,26	2	377	130	-0,17; -0,33	0,18; 0,21
				200	0,08; 0,11	0,12; 0,16
				255	-0,05; -0,06	0,18; 0,26
				395	0,18; 0,21	0,09; 0,12

**Таблица 4.28 – Экспериментальные данные изменения параметра  $\delta$  в зависимости от скорости резания  $V$**

Инструмент	$\alpha, ^\circ$	$\Delta Y, \text{мм}$	$S, \text{мм/мин}$	$V, \text{м/мин}$	$\delta$
Круг CF-FB-0,5AFIN	27,8	4	82	303,2	0,08; 0,12
				606,3	0,13; 0,17
				757,9	0,09; 0,31
				970,1	0,08; 0,49
Круг FS-WL-2SCRS	26,2	2	130	231,2	-0,05; -0,31
				462,4	-0,04; -0,4
				578	-0,33; -0,55
				739,8	-0,5; -0,65
Круг CB-ZS-P180	16,26	2	130	235,6	-0,03; 0,11
				294,5	0,02; 0,28
				377	-0,02; -0,11
				471,2	0,12; 0,21
Круг FF-ZS-ACRS	16,26	2	130	235,6	0,02; 0,08
				294,5	0,01; 0,06
				377	-0,17; -0,33
				471,2	0,02; -0,09

Установлено, что изменение скорости резания и подачи не влияет на показатель  $\delta$ . Это подтверждено статистической обработкой экспериментальных данных по [199] (см. п. 2.5.2). Отношение дисперсии фактора  $S_A^2$  к генеральной дисперсии  $S_0^2$  ( $F = S_A^2/S_0^2$ ) для всех инструментов оказалось меньше квантиля распределения Фишера  $F_{(0,95)}$  при уровне значимости 0,95 (таблица 4.29).



**Таблица 4.29 – Отношение дисперсии фактора (угла  $\alpha$ , скорости резания  $V$ , подачи  $S$  и деформации круга  $\Delta Y$ )  $S_A^2$  к генеральной дисперсии  $S_0^2$  для зависимостей  $\delta(\alpha)$ ,  $\delta(\Delta Y)$ ,  $\delta(V)$ ,  $\delta(S)$ ,  $k(\Delta Y)$ ,  $k(V)$  и  $k(S)$**

Инструмент	F для $\delta(\alpha)$	F для $\delta(\Delta Y)$	F для $\delta(V)$	F для $\delta(S)$	F для $k(\Delta Y)$	F для $k(S)$	F для $k(V)$	Критерий Фишера $F_{(0,95)}$
Круг CF-FB-0,5AFIN	15,374 (значимо)	9,44 (значимо)	0,167	0,592	0,349	0,788	36,881 (значимо)	9,1
Круг FS-WL-2SCRS	10,867 (значимо)	10,625 (значимо)	0,65	0,882	1,196	1,621	9,241 (значимо)	9,1
Круг CB-ZS P180	843,00 (значимо)	12,015 (значимо)	0,317	7,078	2,114	1,178	13,424 (значимо)	9,1
Круг FF-ZS ACRS	1180,638 (значимо)	18,156 (значимо)	2,945	8,247	1,121	1,843	11,367 (значимо)	9,1

На основании проведенных исследований, согласно методике, изложенной в п. 2.5, получена математическая зависимость  $\delta$  от режимных параметров обработки:

$$\delta = a_1 \cdot \alpha^2 + a_2 \cdot \Delta Y^2 + a_3 \cdot \alpha + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot \Delta Y \cdot \alpha + a_6, \quad (4.37)$$

где  $\alpha$  – угол, характеризующий положение круга относительно обрабатываемой кромки в градусах,  $\Delta Y$  – деформация инструмента, мм.

Значения коэффициентов  $a_1$ – $a_6$  приведены в таблице 4.30.

Как было отмечено ранее, при назначении режимных параметров обработки, необходимо обеспечить близость к нулю (в идеале – равенство нулю) параметра  $\delta$ .

**Таблица 4.30 – Значения коэффициентов в уравнении (4.37)**

Коэффициент	Круг CF-FB 0,5A FIN	Круг FS-WL 2S CRS	Круг CB-ZS P180	Круг FF-ZS ACRS
$a_1$	$-2,2095 \cdot 10^{-4}$	$-2,4724 \cdot 10^{-3}$	-0,0706305	$-3,6853 \cdot 10^{-3}$
$a_2$	0,119885	0,398099	1,36642	0,0502261
$a_3$	-0,0249246	0,159299	3,41477	0,0751851
$a_4$	-1,21977	-2,14867	-6,04949	-1,33592
$a_5$	0,0165369	$8,8884 \cdot 10^{-3}$	-0,048132	0,0667152
$a_6$	2,17522	-0,617307	-31,3847	-0,0472628

#### **Относительная погрешность по круглости – $k$**

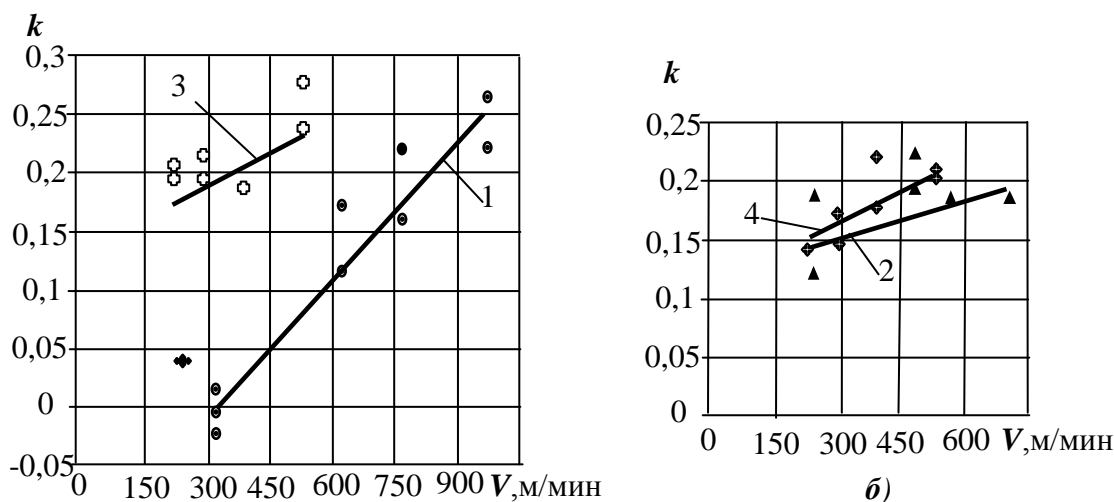
С помощью данного показателя относительной погрешности формы радиуса (4.20) можно охарактеризовать геометрическую точность радиуса скругления. По ГОСТ 30893.1-2002 (ИСО 2768-1-89) предусмотрены предельные отклонения притупленных кромок (наружных радиусов скругления и высот фасок):

- для точного (f) и среднего (m) классов точности –  $\pm 0,2$  мм;
- для грубого (c) и очень грубого (v) классов точности –  $\pm 0,4$  мм.

На основании экспериментальных данных, установлена зависимость относительной погрешности по круглости  $k$  от скорости резания  $V$  и приведена на рисунке 4.44. Установлено, что

значения  $k$  изменяются в диапазоне от 0 до 0,25. При этом установлено, что при радиусе до 1 мм погрешность формы находится в пределах 0,25 мм, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 30893.1-2002 для грубого и очень грубого классов точности. Для точного и среднего класса точности при наибольшем значении  $k = 0,25$  допустимому значению погрешности формы соответствует радиус до 0,8 мм.

Доказано, что если обеспечить равенство нулю параметра  $\delta$ , то относительная погрешность формы радиуса  $k$  уменьшится.



а)

- 1 – Круг CF-FB 0,5A FIN при  $\Delta Y=4$  мм,  $\alpha=27,8^\circ$ ,  $S=82$  мм/мин;
- 2 – Круг FS-WL 2S CRS при  $\Delta Y=2$  мм,  $\alpha=26,2^\circ$ ,  $S=130$  мм/мин;
- 3 – Круг CB-ZS P180 при  $\Delta Y=2$  мм,  $\alpha=16,26^\circ$ ,  $S=130$  мм/мин;
- 4 – Круг FF-ZS ACRS при  $\Delta Y=2$  мм,  $\alpha=16,26^\circ$ ,  $S=130$  мм/мин.

**Рисунок 4.44 – Зависимости относительной погрешности формы радиуса –  $k$  от скорости резания  $V$  для инструментов**

В таблицах 4.27 и 4.31 приведены экспериментальные данные параметра  $k$  в зависимости от изменения подачи  $S$  (см. таблицу 4.27) и деформации круга  $\Delta Y$  (см. таблицу 4.31), по которым установлено, что подача  $S$  и деформации круга  $\Delta Y$  не оказывают влияния на данный параметр. Это подтверждено статистической обработкой экспериментальных данных по [199] (см. п. 2.5.2). Отношение дисперсии фактора (подачи)  $S_A^2$  к генеральной дисперсии  $S_0^2$  ( $F = S_A^2/S_0^2$ ) для всех инструментов оказалось меньше квантиля распределения Фишера  $F_{(0,95)}$  при уровне значимости 0,95 (см. таблицу 4.29).

Управление величиной  $k$ , если это необходимо, может осуществляться за счет снижения скорости резания  $V$  (см. рисунок 4.44).

Поскольку параметр  $k$  не зависит от деформации  $\Delta Y$  и подачи  $S$ , зависимость от скорости резания  $V$  можно представить линейным выражением:  $k = b \cdot V + c$ . (4.38)

**Таблица 4.31 – Экспериментальные данные изменения параметра  $k$  в зависимости от деформации  $\Delta Y$**

Инструмент	$\alpha, ^\circ$	$S, \text{мм/мин}$	$V, \text{м/мин}$	$\Delta Y, \text{мм}$	$k$
Круг CF-FB-0,5AFIN	27,8	82	606,3	3	0,1; 0,23
				3,5	0,06; 0,15
				4	0,13; 0,17
				4,5	0,09; 0,28
Круг FS-WL-2SCRS	26,2	130	462,4	1,5	0,03; 0,09
				2	0,19; 0,23
				2,5	0,02; 0,08
				3	0,03; 0,21
Круг CB-ZS-P180	16,26	130	377	1	0,02; 0,09
				2	0,12; 0,18
				3	0,16; 0,26
				4	0,19; 0,23
Круг FF-ZS-ACRS	16,26	130	377	1	0,12; 0,18
				2	0,18; 0,21
				3	0,22; 0,39
				4	0,15; 0,2

Значения коэффициентов и свободного члена (4.38) приведены в таблице 4.32.

**Таблица 4.32 – Значения коэффициентов в уравнении (4.38)**

Инструмент	Коэффициент $b$	Свободный член $c$
Круг CF-FB 0,5A FIN	$3,134 \cdot 10^{-4}$	-0,094
Круг FS-WL 2S CRS	$7,863 \cdot 10^{-5}$	0,1318
Круг CB-ZS P180	$2,546 \cdot 10^{-4}$	0,11
Круг FF-ZS ACRS	$2,546 \cdot 10^{-4}$	0,09

#### **4.2.2 Экспериментальное исследование производительности процесса скругления кромок при помощи эластичных полимерно-абразивных кругов**

##### ***Фактический радиус скругления – $r_\phi$***

Фактический радиус скругления ( $r_\phi$ ) представляет собой радиус окружности, построенной по трем точкам: А, В, точка на вершине дуги по размеру  $h$  (см. рисунок 4.11, а).

Экспериментальными исследованиями фактического радиуса скругления по (4.11) от режимных параметров обработки установлено следующее:

- с увеличением величины деформации инструмента  $\Delta Y$ , фактический радиус скругления для всех исследованных кругов увеличивается (рисунок Б.8 приложения Б). Это объясняется тем, что с увеличением деформации растет вертикальная составляющая силы, а, следовательно, и увеличивается глубина внедрения единичных зерен в обрабатываемый материал;

- с увеличением скорости вращения  $V$ , фактический радиус скругления увеличивается (рисунок Б.9 приложения Б). Это связано с увеличением динамической составляющей силы удара абразивного зерна по обрабатываемой поверхности;
- с увеличением подачи вдоль кромки  $S$ , фактический радиус скругления уменьшается (рисунок Б.10 приложения Б). Это объясняется тем, что с увеличением подачи вдоль кромки уменьшается время обработки (при одинаковой деформации и скорости вращения).

Зависимости фактического радиуса скругления  $r_\phi$  от деформации инструмента  $\Delta Y$ , скорости вращения  $V$ , подачи вдоль кромки  $S$  имеют характер, аналогичный зависимостям, полученным при исследованиях скругления острых кромок торцевыми полимерно-абразивными щетками и приведенным в п. 4.1.3.

### **Относительный снятый слой кромки – $\rho$**

Характеризует производительность процесса и представляет собой фактический размер снятой кромки при обработке 1 мм ширины инструмента.

Экспериментальными исследованиями относительного снятого слоя кромки одним миллиметром ширины инструмента по (4.12) установлено, что в зависимости от  $\Delta Y$  (см. рисунок Б.8 приложения Б) и от скорости  $V$  (см. рисунок Б.9 приложения Б) относительный снятый слой кромки одним миллиметром ширины инструмента увеличивается, а с увеличением подачи  $S$  (см. рисунок Б.10 приложения Б) – уменьшается. Это объясняется причинами, аналогичными тем, что объясняют зависимости формирования радиуса скругления  $r_\phi$  от режимных параметров обработки.

**Таблица 4.33 – Результаты дисперсионного анализа зависимостей величины  $\rho$  от скорости резания  $V$ , деформации инструмента  $\Delta Y$  и подачи вдоль кромки  $S$**

Марка круга	Функция	$S_A^2$	$S_0^2$	$F=S_A^2/S_0^2$	Значимость влияния фактора	Доверительные границы $S_0 \cdot t$
CF-FB 0,5 AFIN	$\rho = f(\Delta Y)$	$4,77 \cdot 10^{-5}$	$1,74 \cdot 10^{-6}$	27,34	значимо	$\pm 2,906 \cdot 10^{-3}$
	$\rho = f(V)$	$3,62 \cdot 10^{-5}$	$6,72 \cdot 10^{-6}$	5,382	значимо	$\pm 5,703 \cdot 10^{-3}$
	$\rho = f(S)$	$2,05 \cdot 10^{-5}$	$2,92 \cdot 10^{-6}$	7,009	значимо	$\pm 3,762 \cdot 10^{-3}$
FS-WL 2S CRS	$\rho = f(\Delta Y)$	$2,05 \cdot 10^{-4}$	$4,25 \cdot 10^{-6}$	48,209	значимо	$\pm 4,535 \cdot 10^{-3}$
	$\rho = f(V)$	$3,43 \cdot 10^{-4}$	$6,75 \cdot 10^{-6}$	50,778	значимо	$\pm 5,716 \cdot 10^{-3}$
	$\rho = f(S)$	$9,33 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$	8,615	значимо	$\pm 2,29 \cdot 10^{-3}$
CB-ZS P180	$\rho = f(\Delta Y)$	$2,43 \cdot 10^{-4}$	$9,32 \cdot 10^{-7}$	260,236	значимо	$\pm 2,124 \cdot 10^{-3}$
	$\rho = f(V)$	$1,41 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	56,222	значимо	$\pm 1,1 \cdot 10^{-3}$
	$\rho = f(S)$	$2,67 \cdot 10^{-5}$	$4,24 \cdot 10^{-7}$	62,834	значимо	$\pm 1,433 \cdot 10^{-3}$
FF-ZS ACRS	$\rho = f(\Delta Y)$	$1,49 \cdot 10^{-4}$	$6,25 \cdot 10^{-8}$	2387,00	значимо	$\pm 5,5 \cdot 10^{-4}$
	$\rho = f(V)$	$2,32 \cdot 10^{-5}$	$2,17 \cdot 10^{-8}$	1071,795	значимо	$\pm 3,24 \cdot 10^{-4}$
	$\rho = f(S)$	$1,36 \cdot 10^{-5}$	$9,0 \cdot 10^{-8}$	151,21	значимо	$\pm 6,6 \cdot 10^{-4}$

В таблице 4.33 приведены результаты дисперсионного анализа зависимостей параметра производительности процесса обработки кромки  $\rho$  от режимных параметров обработки при доверительной вероятности 0,95.

Заключение о значимости влияния рассматриваемого фактора  $\Delta Y$ ,  $V$  и  $S$  на величину  $\rho$  получено с использованием критерия Фишера (см. п. 2.5.2).  $F_{0,95}$  – критерий Фишера при доверительной вероятности 0,95. Этот критерий при степенях свободы  $f_1 = k - 1 = 3$  и  $f_2 = k(n - 1) = 8$  по справочным данным [199] равен  $F_{0,95} = 4,1$ .

Доверительные границы определены как  $\pm S_0 \cdot t$ , где  $t$  – квантиль Стьюдента. При количестве степеней свободы 11:  $t = 2,20$ .

На основании проведенных исследований, получена математическая зависимость  $\rho$  от всех рассмотренных режимных параметров обработки. Зависимость получена по методике, описанной в п. 2.5, и имеет вид.

$$\rho = a_1 \cdot \Delta Y^2 + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot S^2 + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot V + a_6 \cdot S + a_7 \cdot \Delta Y \cdot V + a_8 \cdot \Delta Y \cdot S + a_9 \cdot V \cdot S + a_{10} \cdot \Delta Y \cdot V \cdot S + a_{11}, \quad (4.39)$$

где  $\Delta Y$  – деформация инструмента, мм;  $V$  – скорость резания, м/мин;  $S$  – подача вдоль кромки, мм/мин.

Значения коэффициентов  $a_1$ – $a_{10}$  и свободного члена  $a_{11}$  приведены в таблице 4.34.

**Таблица 4.34 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (4.39)**

Коэффициент	CF-FB 0,5A FIN	FS-WL 2S CRS	CB-ZS P180	FF-ZS ACRS
$a_1$	$2,85325 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$8,82353 \cdot 10^{-4}$	0,001
$a_2$	$-6,3375 \cdot 10^{-10}$	$1,215 \cdot 10^{-8}$	$2,45371 \cdot 10^{-8}$	$7,05867 \cdot 10^{-8}$
$a_3$	$-6,2625 \cdot 10^{-7}$	$-3,69625 \cdot 10^{-8}$	$-2,11216 \cdot 10^{-8}$	$3,3033 \cdot 10^{-10}$
$a_4$	$2,4631 \cdot 10^{-3}$	$-2,1125 \cdot 10^{-3}$	$4,9355 \cdot 10^{-5}$	$-6,66667 \cdot 10^{-7}$
$a_5$	$4,42 \cdot 10^{-6}$	$1,14838 \cdot 10^{-5}$	$1,31943 \cdot 10^{-6}$	$5,055 \cdot 10^{-8}$
$a_6$	$-1,00275 \cdot 10^{-5}$	$-1,12238 \cdot 10^{-5}$	$-1,67901 \cdot 10^{-6}$	$-1,35134 \cdot 10^{-5}$
$a_7$	$4,725 \cdot 10^{-7}$	$9,8775 \cdot 10^{-7}$	$2,73859 \cdot 10^{-7}$	$2,6732 \cdot 10^{-8}$
$a_8$	$2,6625 \cdot 10^{-6}$	$-2,47375 \cdot 10^{-6}$	$-1,64831 \cdot 10^{-7}$	$-7,97608 \cdot 10^{-9}$
$a_9$	$-5,0925 \cdot 10^{-9}$	$5,54875 \cdot 10^{-9}$	$1,98937 \cdot 10^{-9}$	$-1,3376 \cdot 10^{-10}$
$a_{10}$	$-2,0745 \cdot 10^{-10}$	$-2,71875 \cdot 10^{-9}$	$9,0522 \cdot 10^{-10}$	$-8,39 \cdot 10^{-12}$
$a_{11}$	0,001	0,006	$1,10294 \cdot 10^{-3}$	-0,003

Полученные результаты по точности и производительности процесса будут являться основой для оптимизации параметров обработки при скруглении кромок деталей машин.

### 4.2.3 Шероховатость поверхности скругленных кромок

Шероховатость поверхности скругленных кромок должна соответствовать требованиям чертежа на обрабатываемые детали (например, для большинства деталей каркаса самолета, шероховатость обработанных поверхностей должна соответствовать  $Ra$  3,2).

Существующие контактные приборы, в том числе профилограф-профилометр Taylor Hobson Form Talysurf i200, не позволяют осуществить измерение микронеровностей на столь малых радиусах закругления.

Поэтому для исследования шероховатости на скругленных кромках образцов использовался оптический профилометр Bruker Contour GT-KI (см. рисунок 2.24). Методика работы с данным прибором и примеры полученных профилограмм приведены в п. Б.1 приложения Б.

На основании совокупности проведенных исследований и измерений, получены зависимости шероховатости на радиусах закругления от режимных параметров обработки для всех исследованных инструментов. Зависимости представлены на рисунках Б.11, Б.12 и Б.13 приложения Б.

Установлено (см. рисунок Б.11 приложения Б), что с увеличением деформации инструмента шероховатость поверхности обработанной кромки увеличивается. Это объясняется тем, что с ростом  $\Delta Y$  увеличивается радиальная сила  $P_y$ , а, следовательно, глубина внедрения абразивных зерен в обрабатываемый материал.

Изменение скорости резания  $V$  и подачи  $S$  не влияет на показатель  $Ra$  (см. рисунки Б.12 и Б.13 приложения Б). Это подтверждено статистической обработкой экспериментальных данных по [199]. Отношение дисперсии фактора (подачи)  $S_A^2$  к генеральной дисперсии  $S_0^2$  ( $F = S_A^2/S_0^2$ ) для всех инструментов оказалось меньше квантиля распределения Фишера  $F_{(0,95)}$  при уровне значимости 0,95 (таблица 4.35).

**Таблица 4.35 – Отношение дисперсии фактора (скорости резания  $V$  и подачи  $S$ )  $S_A^2$  к генеральной дисперсии  $S_0^2$  для зависимостей  $Ra(\Delta Y)$ ,  $Ra(V)$  и  $Ra(S)$**

Инструмент	F для $Ra(\Delta Y)$	F для $Ra(V)$	F для $Ra(S)$	$F_{(0,95)}$	Доверительные границы $S_0 \cdot t$ , мкм
Круг CF-FB-0,5AFIN	12,889 (значимо)	0,679	5,6	9,1	$\pm 0,011$
Круг FS-WL-2SCRS	21,741 (значимо)	1,879	5,6	9,1	$\pm 0,095$
Круг CB-ZS P180	151,256 (значимо)	0,971	0,843	9,1	$\pm 0,114$
Круг FF-ZS ACRS	463,278 (значимо)	5,286	7,143	9,1	$\pm 0,078$

Поскольку  $Ra$  не зависит от скорости резания  $V$  и от подачи  $S$ , имеющаяся зависимость от деформации  $\Delta Y$  была представлена в виде линейного выражения (по методике, изложенной в п. 2.5):  $Ra = b \cdot \Delta Y + c$ . (4.40)

Значения коэффициентов  $b$  и свободного члена  $c$  приведены в таблице 4.36.

**Таблица 4.36 – Значения коэффициентов и свободного члена уравнения (4.40)**

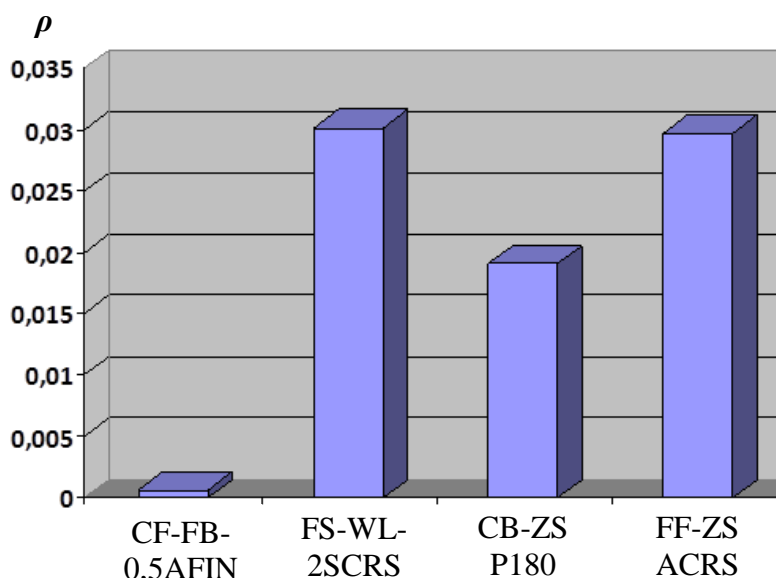
Инструмент	Коэффициент $b$	Свободный член $c$
Круг CF-FB 0,5A FIN	0,167	0,25
Круг FS-WL 2S CRS	0,133	1,8
Круг CB-ZS P180	0,25	0,75
Круг FF-ZS ACRS	0,367	1,233

Для сопоставления эффективности выполнения операции при скруглении кромок исследованными эластичными полимерно-абразивными кругами, в таблице 4.37 приведены результаты определения параметров  $k$ ,  $Ra$  и  $\rho$  при обработке на одинаковых для всех инструментов режимах: скорость резания  $V = 600$  м/мин; деформация круга  $\Delta Y = 3$  мм и продольная подача  $S = 130$  мм/мин.

**Таблица 4.37 – Результаты определения параметров  $k$ ,  $Ra$  и  $\rho$**

№	Инструмент	$k$	$Ra$	$\rho$
1	Круг CF-FB-0,5AFIN	0,09404	0,751	0,0006259
2	Круг FS-WL-2SCRS	0,17998	2,199	0,0301528
4	Круг CB-ZS P180	0,26276	1,500	0,0190376
5	Круг FF-ZS ACRS	0,24276	2,334	0,0297210

На рисунке 4.45 приведена диаграмма относительного снятого слоя крошки для всех исследованных инструментов. Круг FS-WL-2SCRS оказался наиболее производительным, при этом достижимая шероховатость  $Ra$  2,2 удовлетворяет требованиям чертежа ( $Ra$  3,2).



**Рисунок 4.45 – Диаграмма относительного съема крошки эластичными полимерно-абразивными кругами**

Поскольку производительность процесса обработки является критерием оптимизации, относительный снятый слой кромки  $\rho = \frac{P}{B_K}$ , представляющий собой фактический размер снятой кромки при обработке одним миллиметром ширины инструмента, целесообразно рассмотреть подробнее.

Высокая производительность кругов FS-WL 2SCRS и FF-ZS ACRS объясняется их большей зернистостью.

В целом, по результатам исследований, которые описаны в п 4.2, следует сделать вывод о том, что эластичные полимерно-абразивные круги (как и радиальные полимерно-абразивные щетки) являются весьма эффективными инструментами для скругления острых кромок деталей и при правильном применении могут являться неплохим расширением возможностей рассматриваемой технологической операции. Стоит отметить, что данные инструменты требуют ряда особых исследований по износу инструмента, силовому и температурному взаимодействию с обрабатываемой кромкой, которые в рамках настоящей работы не проводились. Методика проектирования технологической операции и оптимизационных решений, рассматриваемых в рамках разрабатываемой системы управления (см. рисунок 2.2), при использовании для скругления кромок эластичных полимерно-абразивных кругов, аналогична методике, предложенной для радиальных полимерно-абразивных щеток.

## Результаты и выводы по главе 4

1. Математическое моделирование процесса скругления кромок, являющееся реализацией системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки в пространстве состояний, позволяет решить проблемы управления производительностью процесса обработки и качеством обработанных кромок.
2. Проведенное математическое моделирование силового взаимодействия ворсин щеток с обрабатываемой кромкой позволяет аналитически объяснить характер влияния режимов обработки на производительность процесса и качество обработанных кромок, а также определить целевую функцию расхода электроэнергии при оптимизации технологической операции и требуемую мощность оборудования для ее выполнения.
3. Исследованиями установлено, что одним из показателей, влияющим на точность месторасположения (позиционирование) обрабатываемой кромки ( $\delta$ ), является положение радиального полимерно-абразивного инструмента относительно обрабатываемой кромки (угол  $\alpha$ ). Оптимальным значением угла  $\alpha$  является значение, при котором  $\delta = 0$ . Установлены оптимальные значения угла  $\alpha$  для исследованных радиальных полимерно-абразивных инструментов.



4. Доказано, что при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами и радиальными полимерно-абразивными щетками, подача вдоль кромки и скорость резания не влияет на точность месторасположения (позиционирование) обрабатываемой кромки ( $\delta$ ). Получены регрессионные зависимости влияния деформации инструмента на данный показатель.
5. Доказано, что режимные параметры при обработке радиальным полимерно-абразивным инструментом влияют на производительность процесса (относительный снятый слой кромки ( $\rho$ ), фактический радиус скругления ( $r_\phi$ ) – для эластичных полимерно-абразивных кругов; относительный снятый слой кромки ( $\rho$ ), фактический радиус скругления ( $r_\phi$ ), абсолютное ( $Q_k$ ) и относительное количество снятого материала ( $q_k$ ) – для радиальных полимерно-абразивных щеток. С увеличением скорости резания и деформации, производительность процесса обработки увеличивается, с увеличением подачи вдоль кромки – уменьшается.
6. Установленные закономерности влияния параметров обработки (деформация инструмента и скорость резания) на шероховатость обработанной поверхности, позволяют использовать данные закономерности при оптимизации процесса обработки кромок эластичными полимерно-абразивными кругами и радиальными полимерно-абразивными щетками с целью обеспечения требуемой шероховатости.
7. Информация о зависимости износа щеток от режимных параметров обработки, полученная при экспериментальных исследованиях, необходима при оптимизации процесса обработки и корректировки натяга инструмента по мере его износа.
8. Допустимыми, из условий стабильной работоспособности исследованных полимерно-абразивных щеток, режимными параметрами по деформации инструмента и скорости резания являются:  $\Delta Y = 1 - 5$  мм,  $V = 15 - 800$  м/мин. Подача  $S$  выбирается исходя из оптимальной производительности процесса обработки и технических возможностей оборудования.
9. Установлено, что точность обработанной кромки эластичными полимерно-абразивными кругами и радиальными полимерно-абразивными щетками, соответствует требованиям отраслевого стандарта авиационной промышленности ОСТ 1.00022-80, по которому предусмотрено притупление кромок, размеры которых не указаны на чертеже, выполнять фаской от 0,1 до 0,4 мм. Если на чертеже указаны предельные размеры кромок или радиусов скругления, то предусмотренные предельные отклонения притупленных кромок (наружных радиусов скругления и высот фасок) по всем классам точности ( $\pm 0,2$  и  $\pm 0,4$  мм) успешно выполняются согласно ГОСТ 30893.1-2002.
10. Достижимая шероховатость в пределах допустимых деформации полимерно-абразивных инструментов и скорости резания при обработке сплава В95пчТ2 составляет: для щетки ВВ-ZB Type А P50 –  $Ra$  1,6 – 3,2; для щетки ВВ-ZB Type С P120 –  $Ra$  1,0 – 1,8; для щетки ВВ-ZB Type С P220 –  $Ra$  0,8 – 1,4; для круга FS-WL 2S CRS –  $Ra$  2,0 – 2,2; для круга CF-FB 0,5A FIN –  $Ra$

0,75–1,1; для круга CB-ZS P180 –  $Ra$  1,15–1,7; для круга FF-ZS ACRS –  $Ra$  1,9– 2,7. При дальнейшей оптимизации процесса финишной обработки, достижимая шероховатость обрабатываемой поверхности будет использована в качестве ограничительной функции.

## **5 Исследование технологических процессов зачистки поверхностей и скругления острых кромок торцевыми полимерно-абразивными щетками<sup>1</sup>**

Данный раздел является реализацией системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки эластичными полимерно-абразивными инструментами, путем создания подсистем в пространстве состояний по теоретическому моделированию: сил взаимодействия ворсин торцевых полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой плоскостью и кромкой, температуры в зоне обработки при обработке плоскостей, а также по математическому моделированию производительности процесса и качества обработки плоскостей и кромок, температуры на кромке в зоне резания, износа торцевых щеток при обработке плоскостей и кромок на основе экспериментальных данных.

### **5.1 Обработка кромок торцевыми полимерно-абразивными щетками**

Полимерно-абразивные щетки, как было отмечено ранее, являются весьма эффективными инструментами для скругления кромок на деталях в самолетостроении, ракетостроении и других отраслях машиностроения. Успешное применение радиальных полимерно-абразивных щеток при скруглении кромок рассмотрено в главе 4.

Разновидности торцевых щеток подробно рассмотрены в работе [59]. Торцевые абразивсодержащие щетки с ворсинами из различных материалов широко применяются для обработки изделий из металлов, древесины, пластмасс и других материалов.

В настоящее время такие щетки выпускаются рядом компаний [155, 270, 298, 300, 323 и др.].

#### **5.1.1 Параметры исследованных щеток**

Торцевые полимерно-абразивные щетки могут эффективно применяться для скругления кромок в труднодоступных для радиальных щеток местах.

Компанией 3М (Minnesota Mining and Manufacturing Company) [270] выпускаются торцевые щетки Scotch-Brite™ Bristle BD-ZB (см. рисунок 2.12) и Scotch-Brite™ Bristle RD-ZB. Высокоскоростные торцевые щетки RD-ZB изготовлены из специального полимерного материала, по всему объему которого распределены зерна минерала 3М™ Cubitron™ (см. таблицу 2.2). В таблице 5.1 приведены основные характеристики данных щеток.

На рисунке 5.1 представлен эскиз щеток Scotch-Brite™ Bristle BD-ZB, при помощи которых в настоящей работе проведен комплекс экспериментальных исследований.

---

<sup>1</sup> Результаты данных исследований опубликованы автором лично и в соавторстве в работах [71, 72, 186].

Таблица 5.1 – Характеристики торцевых полимерно-абразивных щеток компании 3М

Обозначение	Цвет	Зернистость	Диаметр, мм	Максимальная частота вращения, заявленная производителем, об/мин
Scotch-Brite™ Bristle BD-ZB	Зеленый	P50	115	6000
	Оранжевый	P80		
	Белый	P120		
Scotch-Brite™ Bristle RD-ZB	Зеленый	P50	75	10000
	Оранжевый	P80		
	Белый	P120		
	Зеленый	P50	50	15000
	Оранжевый	P80		
	Белый	P120		

Кроме приведенных на рисунке 5.1 геометрических размеров, при исследовании процесса обработки этим инструментом необходимо знать: плотность материала щетки и модуль упругости первого рода.

Плотность материала  $\gamma_e$

определялась путем взвешивания щетки на аналитических весах (см. рисунок 2.21) и определением объема вытесненной жидкости при размещении щетки в мензурке. Результаты определения плотности по пяти измерениям составляют  $\gamma_e = 1,59 \text{ г/см}^3$ .

Модуль упругости первого рода на изгиб определялся на установке, схема которой показана на рисунке 4.3.

Диск закреплялся в тисках таким образом, что одна из ворсин располагалась строго горизонтально, рейсмасом измерялось расстояние  $A_1$  от плиты до вершины ворсины, затем на конец ворсины подвешивался груз

$m$  и измерялся размер  $A_2$  (см. рисунок 4.3). Деформация определялась как  $W = A_1 - A_2$ .

Измерения производились на двух ворсинах.

$$\text{Модуль упругости рассчитывался по формуле: } E = \frac{P \cdot l_B^3}{3 \cdot J_{xcp} \cdot W}, \quad (5.1)$$

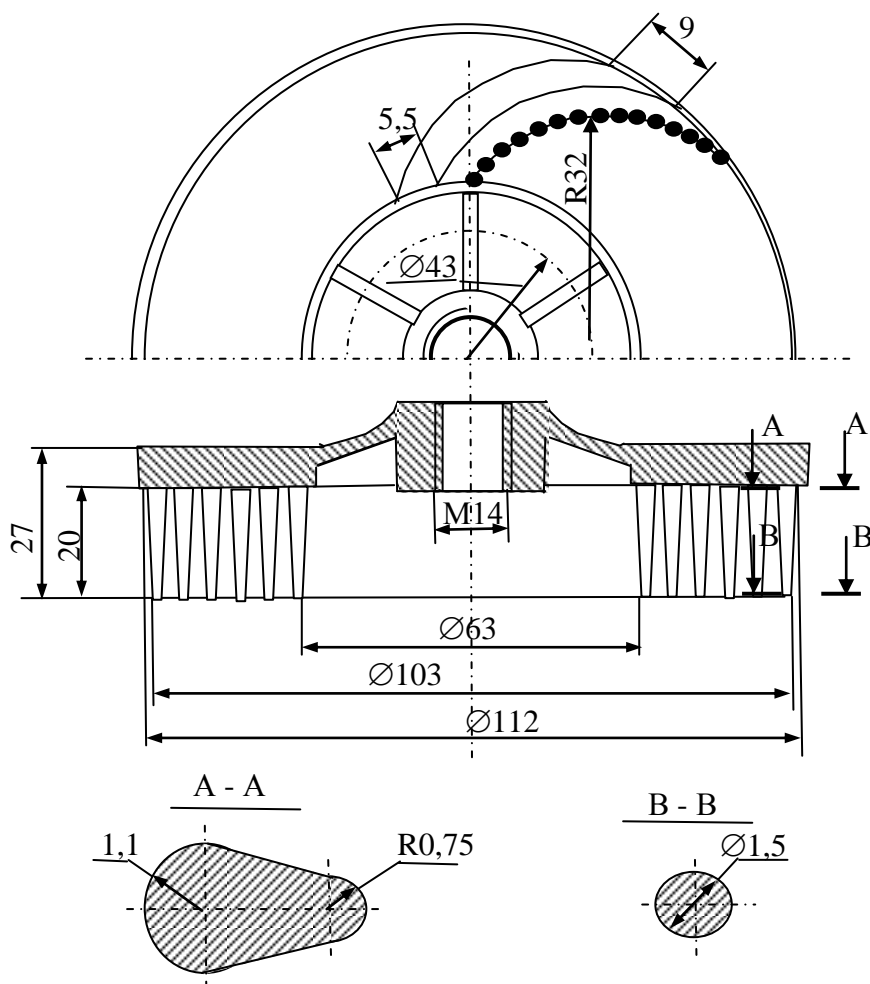


Рисунок 5.1 – Торцевая щетка состоит из 36-и рядов, в ряде – 15 ворсин, всего 540 ворсин

где  $P$  – нормальная составляющая силы, изгибающей ворсину,  $J_{\text{ср}}$  – средний осевой момент инерции по сечениям в точке закрепления и на вершине ворсины,  $l_b$  – длина ворсины, которая для исследуемых инструментов равна 20 мм (см. рисунок 5.1).

Момент инерции в сечении А–А (см. рисунок 5.1) состоит из суммы моментов инерций трех фигур: полукругов радиусами  $R$  1,1 мм и  $R$  0,75 мм и трапеции шириной  $b = 1,65$  мм и средней высотой  $h = \frac{2,2+1,5}{2} = 1,75$  мм.

$$\text{Для полукругов: } J_y = \frac{\pi \cdot d_{1,2}^4}{128} \approx 0,0245 \cdot d_{1,2}^4. \text{ Для трапеции: } J_y = \frac{b \cdot h^3}{12}.$$

$$\text{Момент инерции в сечении В–В (см. рисунок 5.1) равен: } J_y = \frac{\pi \cdot d_1^4}{64} \approx 0,049 \cdot d_1^4.$$

Средний момент инерции по сечениям А–А и В–В определится как:

$$J_{\text{ср}} = \frac{J_{yAA} + J_{yBB}}{2} = \frac{3 \cdot \pi \cdot d_1^4 + \pi \cdot d_2^4}{256} + b \cdot h^3.$$

$$\text{Для щетки, приведенной на рисунке 5.1: } J_{\text{ср}} = 0,84147 \text{ мм}^4$$

Результаты данных исследований приведены в таблице 5.2.

**Таблица 5.2 – Модуль упругости первого рода материала щеток**

Обозначение	P50			P80			P120		
	W, мм	P, Н	E, Н/мм <sup>2</sup>	W, мм	P, Н	E, Н/мм <sup>2</sup>	W, мм	P, Н	E, Н/мм <sup>2</sup>
Scotch-Brite™ Bristle BD-ZB Ø115 мм	0,5	0,098	452,8	0,5	0,098	452,8	0,5	0,098	452,8
	1,0	0,196	452,8	1,0	0,196	452,8	1,0	0,196	452,8
	1,5	0,294	452,8	1,5	0,294	452,8	1,5	0,294	452,8
	3	0,490	377,34	2,5	0,490	452,8	2,5	0,490	452,8
	3,5	0,588	388,12	3,0	0,588	452,8	3,0	0,588	452,8
	4,5	0,686	352,18	3,5	0,686	452,8	3,5	0,686	452,8
$E_{\text{ср}}$			412,68			452,8			452,8

### 5.1.2 Теоретические положения силового взаимодействия ворсин торцевых полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой кромкой и их экспериментальное подтверждение

#### *Силы резания, возникающие при обработке кромки, расположенной по оси торцевой щетки $A=0$*

На обрабатываемую кромку действуют силы  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$ , показанные на рисунке 5.2.

Расчет сил будет производиться при взаимодействии ворсин в пределах от периферии круга до его оси. На второй половине щетки значения силы будут численно такими же, но иметь противоположное направление.

При взаимодействии ворсины с обрабатываемой кромкой, каждая из сил  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  состоит из упругой и ударной составляющих.

#### *Упругая составляющая силы $P_z$*

$$\text{Упругая составляющая определяется по уравнению: } P_{\text{уп}} = \frac{3 \cdot W_z \cdot E \cdot J_{\text{ср}}}{l_b^3}, \quad (5.2)$$

где  $W_z$  – упругая деформация ворсины (рисунок 5.3);

$E$  – модуль упругости первого рода ворсины на изгиб, который определялся по уравнению (5.1).  
 Результаты определения модуля упругости приведены в таблице 5.2.

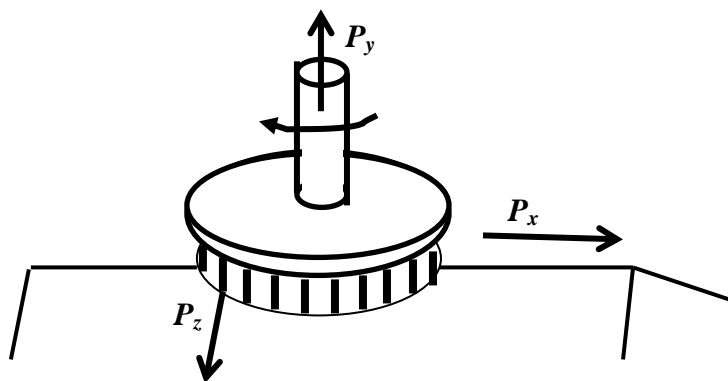


Рисунок 5.2 – Схема действующих сил

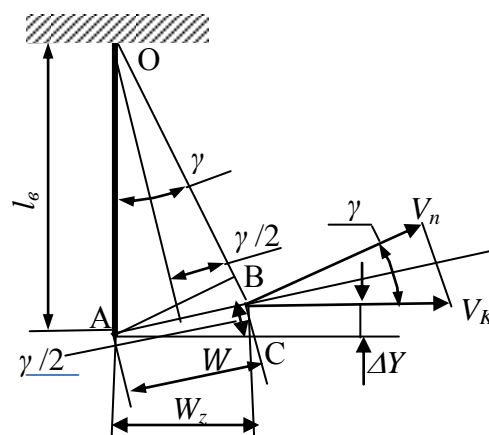


Рисунок 5.3 – Схема к расчету сил взаимодействия по 1-му ряду ворсин

По заданной деформации щётки  $\Delta Y$  необходимо определить деформацию ворсины  $W$  для первого ряда по рисунку 5.3.

Из треугольника ACB:  $\Delta Y = W \cdot \sin(\gamma/2)$ .

Из треугольника AOB:  $W = l_b \cdot \gamma$ , (угол  $\gamma$  в радианах). (5.3)

Для первого ряда ворсин (рисунок 5.3):  $\Delta Y = W_1 \cdot \sin \frac{\gamma_1}{2}$ . (5.4)

Решая совместно уравнения (5.3) и (5.4) и принимая  $\sin(\gamma_1/2) = \gamma_1/2$  (в радианах), получим:

$$\Delta Y = \frac{W_1^2}{2l_b}. \quad (5.5)$$

Из этого уравнения:  $W_1 = \sqrt{2 \cdot \Delta Y \cdot l_b}$ . (5.6)

Деформация перпендикулярная к ворсине равна:  $W_z = W_1 \cdot \cos \frac{\gamma_1}{2}$ . (5.7)

Для последующих рядов:  $\sin \gamma_i = \frac{W_z i}{l_b}$ ,

где  $i$  – номер ряда ворсин ( $i = 2, 3$ ).

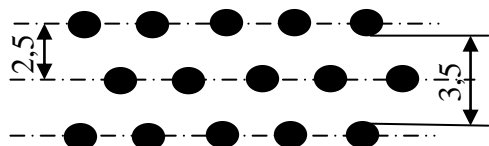


Рисунок 5.4 – Схема расположения ворсин по оси щетки

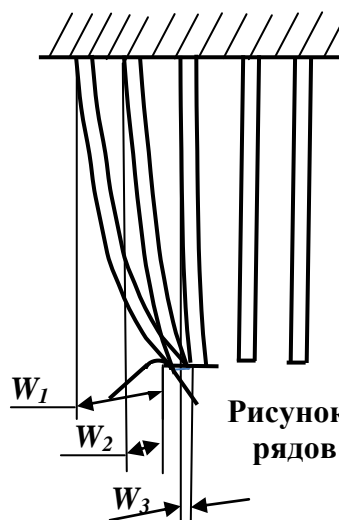


Рисунок 5.5 – Деформация рядов ворсин на щетке

Количество одновременно действующих на обрабатываемую кромку ворсин исследовано на реальных щетках (см. рисунок 5.1) при различных значениях расстояний положения кромки относительно оси щетки (величина  $A$  на рисунке 5.8) и получена следующая зависимость:

$$N_B = 5 \cdot e^{0,02236 \cdot A}. \quad (5.8)$$

При  $A = 0$  одновременно на кромку действуют 5 ворсин 1-го ряда с деформацией  $W_{z1}$  (рисунок 5.4 и рисунок 5.5), 5 ворсин 2-го ряда, расположенных в шахматном порядке относительно 1-го ряда, действуют на кромку с деформацией  $W_{z2} = W_{z1} - 2,5$  мм. Действие 3-го и последующих рядов в расчетах не учитывается в связи с тем, что непосредственно на кромку они не действуют, а воздействовать могут только через предыдущие ряды.

Суммарная упругая составляющая силы, в соответствии с уравнением (5.2), определится как:  $P_{z \text{ уп}} = \frac{3 \cdot E \cdot J_{\text{уп.ср}}}{l_B^3} (W_{z1} + W_{z2}) \cdot N_B$ , (5.9)

где  $W_{z1}$  и  $W_{z2}$  – упругая деформация ворсин 1-го и 2-го рядов по формуле (5.7);  $N_B$  – количество ворсин в одном ряду (5.8).

В таблице 5.3 приведены результаты расчета деформаций ворсин по формулам (5.4), (5.6), (5.7) в зависимости от заданной деформации щетки  $\Delta Y$ .

**Таблица 5.3 – Деформация ворсин, участвующих в контакте с кромкой**

$\Delta Y$ , мм	$W1$ , мм	1-ый ряд ворсин		2-ой ряд ворсин	
		$\gamma_1$ , град.	$W_{z1}$ , мм	$\gamma_2$ , град.	$W_{z2}$ , мм
1	6,324	18,20	6,244	10,79	3,744
1,5	7,795	22,33	7,647	14,91	5,147
2	8,944	25,84	8,717	18,11	6,217
3	10,95	31,79	10,53	23,672	8,03
4	12,65	36,87	12,00	28,36	9,5

#### *Упругая составляющая силы $P_z$ от подачи $S$*

За время нахождения ворсины в контакте с обрабатываемой кромкой при деформации  $W_{z1,2}$  и подаче  $S$  в направлении оси  $X$ , ворсина деформируется на величину  $W_{zs1,2}$ :

$$W_{zs1,2} = S \cdot t_{s1,2}, \quad (5.10)$$

где  $t_s$  – время контакта ворсины с кромкой, с.:  $t_{s1,2} = \frac{W_{z1,2}}{\pi \cdot n \cdot d_{щ}}$ , (5.11)

где  $n$  – частота вращения щетки, об/мин;  $d_{щ}$  – диаметр щетки, мм.

Суммарная упругая составляющая силы, в соответствии с уравнением (5.9) и (5.10), определится как:  $P_{zs \text{ уп}} = \frac{3 \cdot E \cdot J_{\text{уп.ср}} \cdot N_B}{l_B^3} \cdot (W_{z1} + W_{z2}) \cdot \left(1 + \frac{S}{\pi \cdot n \cdot d_{щ}}\right)$ . (5.12)

### Упругая составляющая силы $P_x$

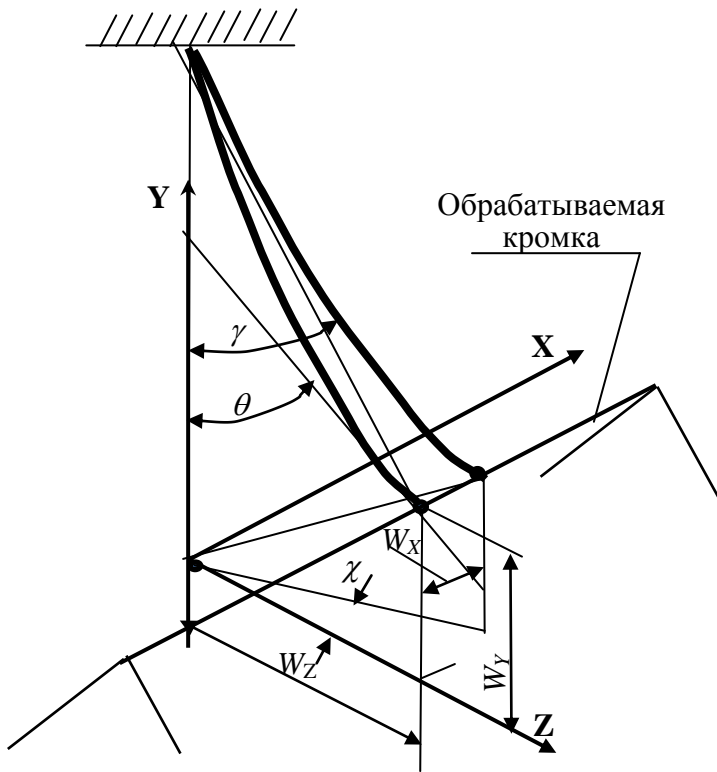


Рисунок 5.6 – Схема к расчету деформаций по осям X, Y и Z

Сила  $P_x$  возникает в результате движения инструмента относительно обрабатываемой кромки с подачей  $S$ . Чем больше подача, тем больше изгибается ворсина по оси X и, как следствие, упругая составляющая силы  $P_x$  увеличивается.

За время нахождения ворсины в контакте с обрабатываемой кромкой при деформации  $W_{Z\ 1,2}$  и подаче  $S$  в направлении оси X, ворсина деформируется на величину  $W_{X\ 1,2}$  (рисунок 5.6):  $W_{X\ 1,2} = S \cdot t_{S\ 1,2}$ , (5.13) где  $t_{S\ 1,2}$  – время контакта ворсины с кромкой по уравнению (5.11).

Суммарная упругая составляющая силы, в соответствии с уравнением (5.2), определится как:

$$P_{x\ \text{уп}} = \frac{3 \cdot E \cdot J_{\text{уп.ср}}}{l_B^3} (W_{X1} + W_{X2}) \cdot N_B. \quad (5.14)$$

Упругая составляющая силы  $P_y$  определится по выражению:

$$P_{y\ \text{уп}} = 3 \cdot E \cdot J_{\text{уп.ср}} \cdot N_B \left( \frac{W_{Y1}}{W_{Z1}^3} + \frac{W_{Y2}}{W_{Z2}^3} \right), \quad (5.15)$$

где  $W_{Y\ 1,2}$  – упругая деформация ворсины в вертикальном направлении (по оси Y). В соответствии с уравнением (5.5):

$$W_{Y\ 1,2} = \frac{W_{Z\ 1,2}^2}{2 \cdot l_B}. \quad (5.16)$$

### Упругая составляющая силы $P_y$ от подачи S

За время нахождения ворсины в контакте с обрабатываемой кромкой при деформации  $W_{Z\ 1,2}$  и подаче  $S$  в направлении оси X, ворсина деформируется на величину  $W_{YS\ 1,2}$ :

$$W_{YS\ 1,2} = \frac{W_{X\ 1,2}^2}{2l_B} = \frac{(S \cdot t_S)^2}{2l_B} = \frac{1}{2l_B} \cdot \left( \frac{S \cdot W_{Z\ 1,2}}{\pi \cdot n \cdot d_{\text{ш}}} \right)^2, \quad (5.17)$$

где  $t_S$  – время контакта ворсины с кромкой по уравнению (5.11).

Суммарная упругая составляющая силы, в соответствии с уравнениями (5.15) и (5.17), определится как:  $P_{yS\ \text{уп}} = \frac{3 \cdot E \cdot J_{\text{уп.ср}} \cdot N_B}{2 \cdot l_B} \cdot \left[ \frac{1}{W_{Z1}} + \frac{1}{W_{Z2}} + \left( \frac{S \cdot W_{Z1}}{\pi \cdot n \cdot d_{\text{ш}}} \right)^2 + \left( \frac{S \cdot W_{Z2}}{\pi \cdot n \cdot d_{\text{ш}}} \right)^2 \right]$ . (5.18)

### Ударная составляющая силы $P_z$

Ударная составляющая силы взаимодействия определяется через ударный импульс.



$$\text{Ударный импульс согласно [41]: } J = m_B \cdot V_z = P_{z\text{уд}} \cdot \tau_{\text{уд}}, \quad (5.19)$$

где  $\tau_{\text{уд}}$  – время удара;  $P_{z\text{уд}}$  – сила удара;  $V_z$  – скорость удара.

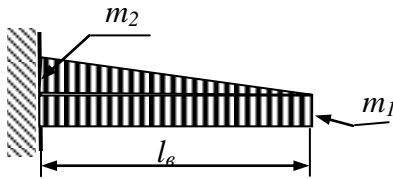
$$\text{Сила удара из (5.19) равна: } P_{z\text{уд}} = \frac{m_B \cdot V_z}{\tau_{\text{уд}}}, \quad (5.20)$$

где  $m_B$  – масса ворсины, участвующая в ударе (на конце ворсины), определяется из соотношения:

$$m_B \cdot l_B = m_1 \cdot l_B \cdot \frac{l_B}{2} + \frac{1}{6} \cdot m_2 \cdot l_B^2, \quad (5.21)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – массы ворсины на единичной длине (рисунок 5.7), которые равны:

$$m_1 = \gamma_{\text{щ}} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}; \quad m_2 = \gamma_{\text{щ}} \cdot \left( \frac{\pi \cdot d_2^2}{8} + b \cdot h - \frac{\pi \cdot d_1^2}{8} \right). \quad (5.22)$$



**Рисунок 5.7 – Схема к расчету ударной составляющей**

Решая совместно уравнения (5.21) и (5.22), получим:

$$m_B = \frac{\gamma_{\text{щ}} \cdot l_B}{48} \cdot (5 \cdot \pi \cdot d_1^2 + \pi \cdot d_2^2 + 8 \cdot b \cdot h).$$

Для щётки, приведенной на рисунке 5.1,  $m_B = 4,90987 \cdot 10^{-5}$  кг.

$$\text{Скорость удара ворсины в (5.20): } V_z = \frac{\pi \cdot n \cdot r_i}{30}, \quad (5.23)$$

где  $n$  – частота вращения щетки, об/мин;

$r_i$  – радиус, на котором расположена ворсинка щетки, м.

При определении скорости  $V_{Zi}$  по уравнению (5.23) радиус  $r_i$  меняется от  $r_{\text{иц}} = 31,5$  мм до  $R_{\text{иц}} = 51,5$  мм. Поэтому для расчетов принимаем среднюю величину  $R_{\text{ср}} = 0,5(r_{\text{иц}} + R_{\text{иц}}) = 41,5$  мм.

*Время удара* (в соответствии с теорией Г. Герца и работой [159]) определяется по формуле:

$$\tau_{\text{уд}} = 3,213 \left( \frac{m_B^2}{V_z \cdot K_{\text{П}}} \right)^{1/5} = 3,213 \left( \frac{m_B}{\sqrt{V_z \cdot K_{\text{П}}}} \right)^{2/5}, \quad (5.24)$$

где  $K_{\text{П}}$  – экспериментальный коэффициент, зависящий от свойств материалов соударяющихся тел и кривизны их поверхностей.

В результате проведения комплекса экспериментальных исследований, получены уравнения для определения коэффициентов  $K_{\text{П}}(x)$ ,  $K_{\text{П}}(y)$  и  $K_{\text{П}}(z)$ :

$$K_{\text{П}}(x,y,z) = (a_1 \cdot n^2 + a_2 \cdot n + a_3) \cdot (a_4 \cdot \Delta Y^3 + a_5 \cdot \Delta Y^2 + a_6 \cdot \Delta Y + a_7) \cdot (a_8 \cdot S^2 + a_9 \cdot S + a_{10}) \cdot (a_{11} \cdot A^3 + a_{12} \cdot A^2 + a_{13} \cdot A + a_{14}). \quad (5.25)$$

В уравнении (5.25) –  $n$  в об/мин,  $\Delta Y$  в м,  $S$  в м/мин.

Значения коэффициентов и свободных членов в уравнении (5.25) приведены в таблице 5.4.

**Таблица 5.4 – Значения коэффициентов и свободных членов в уравнении (5.25)**

Коэфф. и свобод. члены	Материал В95пчТ2		
	$K_{\text{П}}(x)$	$K_{\text{П}}(y)$	$K_{\text{П}}(z)$
$a_1$	$1,37 \cdot 10^7$	911,61891667	$8,292 \cdot 10^{-2}$
$a_2$	$-3,298 \cdot 10^{10}$	$-2,2983381 \cdot 10^6$	-305,1
$a_3$	$8,567 \cdot 10^{13}$	$1,38687453 \cdot 10^9$	295333
$a_4$	0	$-3,2131659996 \cdot 10^9$	0
$a_5$	$2,845 \cdot 10^5$	$2,2143995327 \cdot 10^7$	$6,701 \cdot 10^4$

$a_6$	-538,5	$-4,293982402076 \cdot 10^4$	18,041
$a_7$	0,939	24,008994716356	0,696
$a_8$	116,937	-69,6709667	-5,223
$a_9$	-64,603	34,12857827	6,357
$a_{10}$	7,422	-2,25927584	0,262
$a_{11}$	$-3,293807516783 \cdot 10^4$	$6,73411 \cdot 10^6$	$1,8186 \cdot 10^6$
$a_{12}$	$3,227931390072 \cdot 10^3$	$-5,43901 \cdot 10^5$	$-1,08048 \cdot 10^5$
$a_{13}$	-100,5270073203	$1,07833 \cdot 10^4$	$1,97604 \cdot 10^3$
$a_{14}$	1	1	1
<b>Коэфф. и свобод. члены</b>	<b>Материал ВТ20</b>		
	$K_{II}(x)$	$K_{II}(y)$	$K_{II}(z)$
$a_1$	$1,304 \cdot 10^9$	16,42675	$6,971 \cdot 10^{-3}$
$a_2$	$-3,008 \cdot 10^{12}$	$-4,182755 \cdot 10^4$	-22,3
$a_3$	$3,16 \cdot 10^{15}$	$2,55411 \cdot 10^7$	23718
$a_4$	0	$-1,05388536 \cdot 10^9$	0
$a_5$	$2,745 \cdot 10^5$	$5,818331205 \cdot 10^7$	$4,017 \cdot 10^5$
$a_6$	-607,5	$-1,66172740126 \cdot 10^6$	-1094
$a_7$	1,117	109,04331493	1,582
$a_8$	$6,44192 \cdot 10^3$	1193,7304	19,664
$a_9$	$-1,11827 \cdot 10^3$	-54,5034	-0,127
$a_{10}$	36,6038	1,1834	0,971
$a_{11}$	$-3,293807614742 \cdot 10^4$	$3,172235 \cdot 10^6$	$3,8971 \cdot 10^6$
$a_{12}$	$3,227931467337 \cdot 10^3$	$-2,588009 \cdot 10^5$	$-2,1977 \cdot 10^5$
$a_{13}$	-100,527008802424	$5,7793495 \cdot 10^3$	$3,7604 \cdot 10^3$
$a_{14}$	1	1	1

Суммарная ударная составляющая силы, в соответствии с уравнением (5.20), определится как:  $P_{z \text{ уд}} = m_B \left( \frac{V_{z1}}{\tau_1} + \frac{V_{z2}}{\tau_2} \right) N_B$ . (5.26)

Для расчета времени удара по уравнению (5.24), скорость  $V_{z \text{ ср}}$  принимаем средней по выражению:  $V_{z \text{ ср}} = 0,5 \left[ \left( \frac{\pi \cdot n}{30} \right)^{-0,2} \cdot (r_{\text{ш}}^{-0,2} + R_{\text{ш}}^{-0,2}) \right]$ . (5.27)

В этом случае уравнение (5.24) будет иметь вид:  $\tau_i = 3,213 \cdot V_{z \text{ ср}} \left( \frac{m_B}{K_{II}} \right)^{2/5}$ . (5.28)

Нормальная к ворсине в точке контакта сила равна:  $P_z = P_{z \text{ yn}} + P_{z \text{ yd}}$ .

#### Ударная составляющая силы $P_x$

Определится из выражения:  $P_{x \text{ уд}} = m_B \cdot N_B \cdot \left( \frac{V_{x1}}{\tau_1} + \frac{V_{x2}}{\tau_2} \right)$ , (5.29)

где  $V_{x1,2}$  – средняя скорость ворсин по оси X:  $V_{x1,2} = V_{z1,2} \cdot \text{tg} \chi_{1,2}$ , (5.30)

где  $\chi$  – угол между равнодействующей скоростей  $V_X$  и  $V_Z$  и осью Z.

$$\text{tg} \chi_{1,2} = \frac{W_{x1,2}}{W_{z1,2}}. \quad (5.31)$$

### Ударная составляющая силы $P_y$

$$\text{Определится из выражения: } P_{y \text{ уд}} = m_B \cdot N_B \cdot \left( \frac{V_{Y1}}{\tau_1} + \frac{V_{Y2}}{\tau_2} \right), \quad (5.32)$$

$$\text{где } V_Y \text{ – вертикальная составляющая скорости движения ворсины: } V_Y = V_Z / \operatorname{tg} \theta, \quad (5.33)$$

где  $\theta$  – угол (в радианах) поворота ворсины на ее вершине при воздействии силы  $P_z$ :

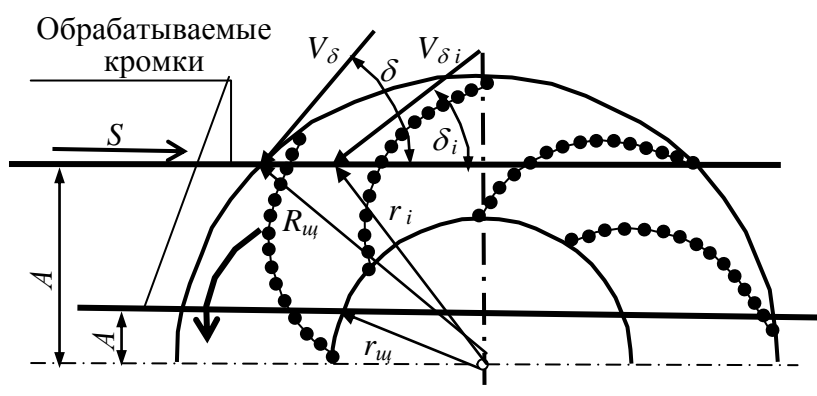
$$\theta = - \frac{P_z \cdot l_B^2}{4 \cdot E \cdot J_{e \text{ ср}} \cdot N_B}.$$

Для расчета времени удара по уравнению (5.24) скорость  $V_{Y \text{ ср}}$  принимаем средней по выражению:  $V_{Y \text{ ср}} = 0,5 \left[ \left( \frac{\pi \cdot n}{30 \cdot \operatorname{tg} \theta} \right)^{-0,2} \cdot (r_{\text{щ}}^{-0,2} + R_{\text{щ}}^{-0,2}) \right]$ .

$$\text{В этом случае уравнение (5.24) будет иметь вид: } \tau_i = 3,213 \cdot V_{Z \text{ ср}} \left( \frac{m_B}{K_{\Pi}} \right)^{2/5}. \quad (5.34)$$

### Силы на единичных ворсинах при обработке кромки, расположенной со смещением относительно оси щетки $A > 0$

На обрабатываемую кромку в пределах от наружного диаметра щетки до ее оси, ворсины действуют в одном направлении (на рисунке 5.8 – сверху вниз). На другой половине щетки такие же ворсины действуют в противоположном направлении.



Поэтому исследование сил выполнено только для одной стороны щетки – в пределах от наружного диаметра щетки до ее оси.

**Рисунок 5.8 – Схема к определению скоростей и угла при взаимодействии ворсин с кромкой детали**

Отличие методики теоретического расчета сил при смещении обрабатываемой кромки

относительно оси щетки ( $A > 0$ ) заключается в том, что ворсины воздействуют на кромку под углом  $\delta$  (см. рисунок 5.8) со скоростью  $V_\delta$ . При этом угол и скорость являются переменными. Поэтому в расчетах необходимо пользоваться средними значениями.

$$\text{При } A < r_{\text{щ}} \text{ средняя скорость равна: } V_{\delta \text{ ср}} = \frac{\pi \cdot n}{1000 \cdot 60} (R_{\text{щ}} + r_i);$$

$$\text{средний угол равен: } \delta_{\text{ср}} = \arccos \frac{2A}{R_{\text{щ}} + r_i}.$$

$$\text{При } A \geq r_{\text{щ}} \text{ средняя скорость равна: } V_{\delta \text{ ср}} = \frac{\pi \cdot n}{1000 \cdot 60} (R_{\text{щ}} + A);$$

$$\text{средний угол равен: } \delta_{\text{ср}} = \arccos \frac{2A}{R_{\text{щ}} + A}.$$

Деформация ворсины, от которой зависит упругая составляющая силы, корректируется в зависимости от угла  $\delta$ :  $W_{Z\delta} = W_Z \cdot \sin \delta$ ,  $W_{X\delta} = W_X$ .

Скорость движения ворсины, от которой зависит ударная составляющая силы, также корректируется в зависимости от угла  $\delta$  (см. рисунок 5.8):

$$V_{Z\delta} = V_{\delta\text{cp}} \cdot \sin\delta, \quad V_{X\delta} = V_{\delta\text{cp}} \cdot \cos\delta, \quad V_{Y\delta} = V_{\delta\text{cp}} \cdot \sin\delta / \text{ctg}\theta.$$

#### **Упругая составляющая силы $P_{z\delta}$**

Определится по уравнению, аналогичному (5.12), с учетом направления движения ворсин (угол  $\delta$  на рисунке 5.8):

$$P_{z\delta\text{уп}} = \frac{3 \cdot E \cdot J_{\text{уп.ср}} \cdot N_B}{l_B^3} \cdot (W_{Z1} + W_{Z2}) \cdot \left(1 + \frac{S}{\pi \cdot n \cdot d_{\text{ш}}}\right) \cdot \sin\delta. \quad (5.35)$$

#### **Упругая составляющая силы $P_{x\delta}$**

$$\text{Определяется по уравнению: } P_{x\delta\text{уп}} = \frac{3 \cdot E \cdot J_{\text{уп.ср}}}{l_B^3} (W_{X1} + W_{X2}) \cdot N_B. \quad (5.36)$$

#### **Упругая составляющая силы $P_{y\delta}$**

Сила по оси  $Y$  определится по выражению с учетом направления движения ворсин (угол  $\delta$ ):

$$P_{y\delta\text{уп}} = \frac{3 \cdot E \cdot J_{\text{уп.ср}} \cdot N_B}{2 \cdot l_B} \cdot \left[ \frac{1}{W_{Z1}} + \frac{1}{W_{Z2}} + \left( \frac{S \cdot W_{Z1}}{\pi \cdot n \cdot d_{\text{ш}}} \right)^2 + \left( \frac{S \cdot W_{Z2}}{\pi \cdot n \cdot d_{\text{ш}}} \right)^2 \right] \cdot \frac{\sin\delta}{\text{tg}\theta}. \quad (5.37)$$

#### **Ударная составляющая силы $P_{z\delta}$**

Суммарная ударная составляющая силы в соответствии с уравнением (5.20) определится как:  $P_{z\delta\text{уд}} = m_B \left( \frac{V_{z\delta 1}}{\tau_{\delta 1}} + \frac{V_{z\delta 2}}{\tau_{\delta 2}} \right) N_B,$  (5.38)

При  $A < r_{\text{ш}}$  средняя скорость равна:  $V_{z\delta 1,2} = 0,5 \cdot \pi \cdot n \cdot (R_{\text{ш}} + r_{\text{ш}}) \cdot \sin\delta.$

При  $A \geq r_{\text{ш}}$  средняя скорость равна:  $V_{z\delta 1,2} = 0,5 \cdot \pi \cdot n \cdot (R_{\text{ш}} + A) \cdot \sin\delta.$

Для расчета времени удара по уравнению (5.24) скорость  $V_{z\delta\text{cp}}$  принимаем средней.

При  $A < r_{\text{ш}}$  средняя скорость равна:  $V_{z\delta\text{cp}} = 0,5 \left[ \left( \frac{\pi \cdot n \cdot \sin\delta}{30} \right)^{-0,2} (r_{\text{ш}}^{-0,2} + R_{\text{ш}}^{-0,2}) \right],$

При  $A \geq r_{\text{ш}}$  средняя скорость равна:  $V_{z\delta\text{cp}} = 0,5 \left[ \left( \frac{\pi \cdot n \cdot \sin\delta}{30} \right)^{-0,2} (A^{-0,2} + R_{\text{ш}}^{-0,2}) \right],$

В этом случае уравнение (5.24) будет иметь вид:  $\tau_{\delta i} = 3,213 \cdot V_{z\delta\text{cp}} \left( \frac{m_B}{K_{\text{п}}} \right)^{2/5}.$

В целом сила  $P_{z\delta}$  будет равна:  $P_{z\delta} = P_{z\delta\text{уп}} + P_{z\delta\text{уд}}. \quad (5.39)$

#### **Ударная составляющая силы $P_x$ от $S$**

Определится из выражения:  $P_{XS\text{уд}} = m_B \cdot N_B \cdot \left( \frac{V_{XS1}}{\tau_1} + \frac{V_{XS2}}{\tau_2} \right),$

где  $V_{XS 1,2}$  – средняя скорость ворсин по оси  $X$ :  $V_{XS 1,2} = V_{z\delta 1,2} \cdot \text{tg}\chi_{1,2},$

где  $\chi$  – угол между равнодействующей скоростей  $V_x$  и  $V_z$  и осью  $Z$ :  $\text{tg}\chi_{1,2} = \frac{V_{X 1,2}}{V_{z\delta 1,2}}.$

$$W_{z\delta 1,2} = W_{z 1,2} \cdot \sin\delta.$$

#### **Ударная составляющая силы $P_x$ от $\delta$**

$$P_{X\delta\text{уд}} = m_B \cdot N_B \cdot \left( \frac{V_{X\delta 1}}{\tau_1} + \frac{V_{X\delta 2}}{\tau_2} \right),$$

При  $A_i < r_{щ}$  средняя скорость равна  $V_{X\delta 1,2} = 0,5 \cdot \pi \cdot n \cdot (R_{щ} + r_{щ}) \cdot \cos\delta$ .

При  $A \geq r_{щ}$  средняя скорость равна  $V_{X\delta 1,2} = 0,5 \cdot \pi \cdot n \cdot (R_{щ} + A) \cdot \cos\delta$ .

Для расчета времени удара по уравнению (5.24), скорость  $V_{Z\text{ ср}}$  принимаем средней.

При  $A < r_{щ}$  средняя скорость равна:  $V_{X\delta\text{ ср}} = 0,5 \left[ \left( \frac{\pi \cdot n \cdot \cos\delta}{30} \right)^{-0,2} (r_{щ}^{-0,2} + R_{щ}^{-0,2}) \right]$ .

При  $A \geq r_{щ}$  средняя скорость равна:  $V_{X\delta\text{ ср}} = 0,5 \left[ \left( \frac{\pi \cdot n \cdot \cos\delta}{30} \right)^{-0,2} (A^{-0,2} + R_{щ}^{-0,2}) \right]$ .

В этом случае уравнение (5.24) будет иметь вид:  $\tau_{X\delta i} = 3,213 \cdot V_{X\delta\text{ ср}} \left( \frac{m_B}{K_{II}} \right)^{2/5}$ .

### **Суммарная ударная составляющая силы $P_{x\delta}$**

Поскольку  $V_{XS1} = V_{XS2}$ , а  $V_{X\delta1} = V_{X\delta2}$ , уравнение суммарной ударной составляющей примет вид:  $P_{X\delta\text{ уд}} = m_B \cdot N_B \cdot \frac{1}{\tau} \cdot (V_{XS1} + V_{XS2} + 2V_{X\delta})$ . (5.40)

В целом сила  $P_{x\delta}$  будет равна:  $P_{x\delta} = P_{x\delta\text{ уп}} + P_{x\delta\text{ уд}}$ . (5.41)

### **Ударная составляющая силы $P_{y\delta\text{ уд}}$**

Определится из выражения:  $P_{y\delta\text{ уд}} = m_B \cdot N_B \cdot \left( \frac{V_{Y\delta1}}{\tau_1} + \frac{V_{Y\delta2}}{\tau_2} \right)$ ,

где  $V_{Y\delta}$  – составляющая скорости движения ворсины по оси Y:  $V_{Y\delta} = V_{\delta\text{ ср}} \cdot \sin\delta / \text{tg}\theta$ ,

где  $\theta$  – угол ( в радианах) поворота ворсины на ее вершине при воздействии силы  $P_x$ .

При  $A < r_{щ}$  средняя скорость равна:  $V_{Y\delta 1,2} = 0,5 \cdot \pi \cdot n \cdot (R_{щ} + r_{щ}) \cdot \sin\delta / \text{tg}\theta$ .

При  $A \geq r_{щ}$  средняя скорость равна:  $V_{Y\delta 1,2} = 0,5 \cdot \pi \cdot n \cdot (R_{щ} + A) \cdot \sin\delta / \text{tg}\theta$ .

Для расчета времени удара по уравнению (5.24) скорость  $V_{Z\text{ ср}}$  принимаем средней.

При  $A < r_{щ}$  средняя скорость равна:  $V_{Y\delta 1,2} = 0,5 \left[ \left( \frac{\pi \cdot n \cdot \sin\delta}{30 \cdot \text{tg}\theta} \right)^{-0,2} (r_{щ}^{-0,2} + R_{щ}^{-0,2}) \right]$ .

При  $A \geq r_{щ}$  средняя скорость равна:

$$V_{Y\delta 1,2} = 0,5 \left[ \left( \frac{\pi \cdot n \cdot \sin\delta}{30 \cdot \text{tg}\theta} \right)^{-0,2} (A^{-0,2} + R_{щ}^{-0,2}) \right].$$

В этом случае уравнение (5.24) будет иметь вид:  $\tau_{\delta i} = 3,213 \cdot V_{Z\delta\text{ ср}} \left( \frac{m_B}{K} \right)^{2/5}$ .

В целом сила  $P_{y\delta}$  будет равна:  $P_{y\delta} = P_{y\delta\text{ уп}} + P_{y\delta\text{ уд}}$ . (5.42)

При экспериментальном исследовании нормальной и тангенциальной составляющих силы резания, образцы из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2 и титанового сплава ВТ20 с острыми кромками (см. рисунок 2.13) крепились в приспособлении и обрабатывались на универсально-фрезерном станке марки Deckel Maho DMC 635V (см. рисунок 2.17).

Измерения проводились на трехкомпонентном динамометре фирмы Kistler (Швейцария), модель 9253В23 (см. рисунок 2.25) по методике, изложенной в п. 2.4.3.

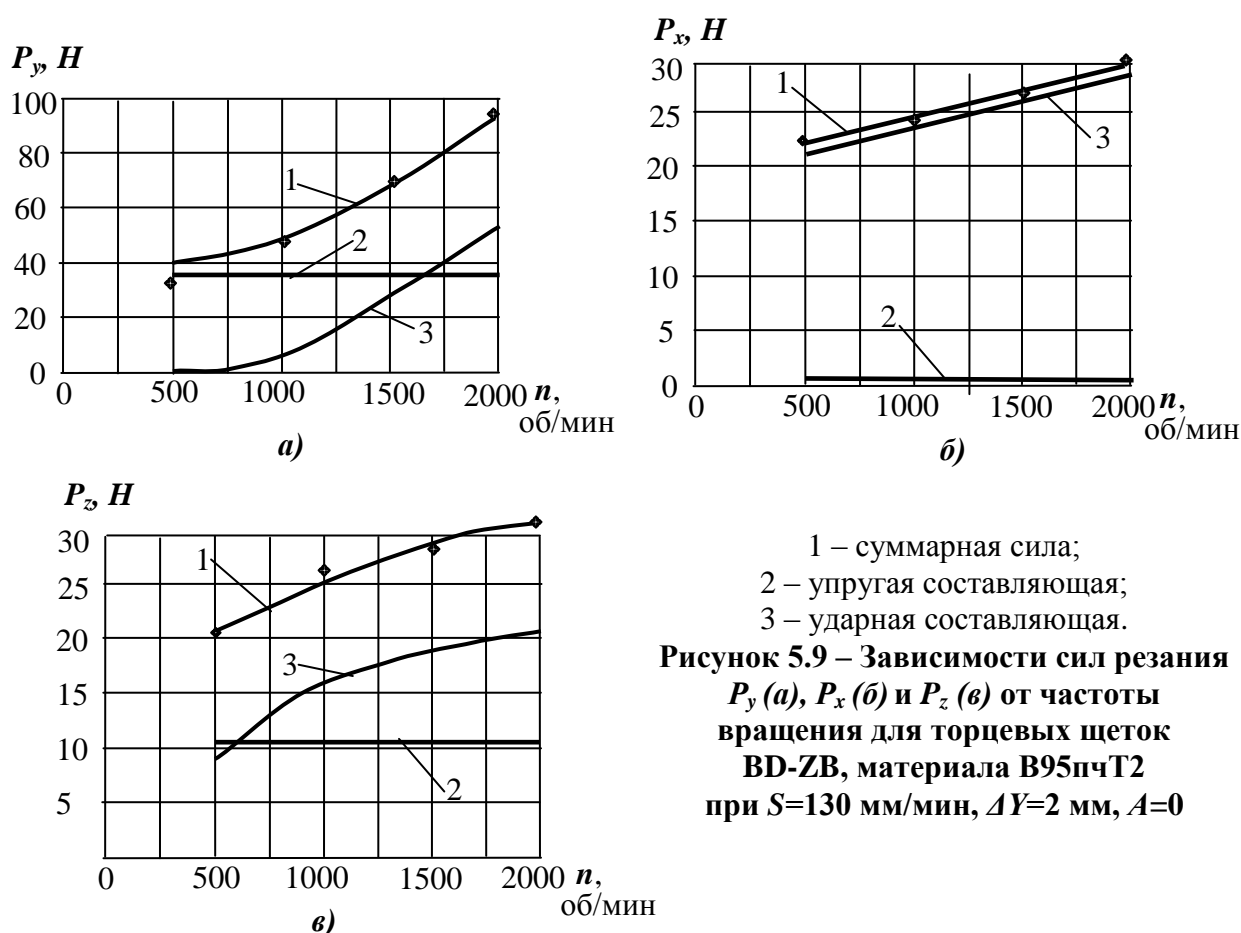
Предварительные опыты на исследуемых щетках показали, что допустимыми, из условий стабильной работоспособности, параметрами по деформации щетки и скорости резания явля-

ются:  $\Delta Y = 0,5 - 2,5$  мм,  $V = 15 - 700$  м/мин. Подача  $S$  выбирается в зависимости от требуемой производительности процесса и возможностей оборудования.

При деформации щетки, скорости резания и подаче меньше вышеуказанных минимальных значений – процесс обработки не целесообразен по производительности. При увеличении деформации и скорости резания больше установленных пределов начинается интенсивное разрушение ворсин.

Результаты расчета сил  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$ , а также упругие и ударные составляющие  $P_{yn}$  и  $P_{y\partial}$ , по всем силам, рассчитанные теоретически, приведены в таблицах В.1 – В.8 приложения В. В этих же таблицах включены экспериментальные данные, полученные как средние арифметические по щеткам BD-ZB P50, BD-ZB P80 и BD-ZB P120. Как показали эксперименты, различие в зернистости несущественно влияет на силы взаимодействия ворсин с обрабатываемой кромкой.

Это подтверждено результатами дисперсионного анализа экспериментальных данных. На рисунках 5.9 – 5.12 статистически обработанные экспериментальные данные, как среднеарифметические по щеткам трех зернистостей, проставлены точками, а теоретически рассчитанные – сплошными линиями.



Установлено, что с увеличением частоты вращения щетки, силы  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  для материалов В95пчТ2 и ВТ20 растут (см. таблицы В.1, В.2 приложения В и рисунок 5.9). При этом, ударные составляющие  $P_{y\partial}$  растут в связи с увеличением скорости резания в соответствии с уравнениями (5.26), (5.29) и (5.32). Упругая составляющая  $P_{yn}$  для силы  $P_x$  с увеличением частоты вращения

уменьшается из-за уменьшения времени контакта ворсин с кромкой (см. уравнения (5.13) и (5.14)). Однако при существенно большей  $P_{y\delta}$  по сравнению с  $P_{yn}$  в целом сила  $P_x$  с увеличением частоты растет.

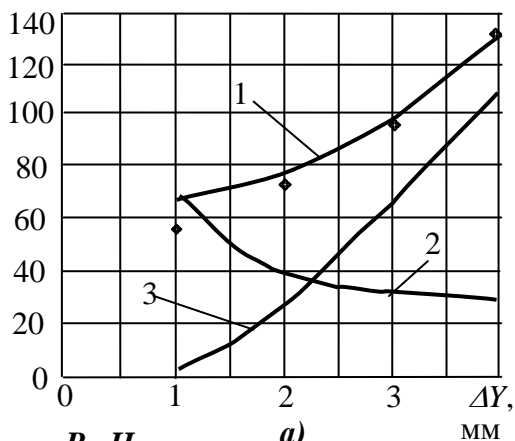
Из таблиц В.3 и В.4 приложения В, а также рисунка 5.10 видно, что с ростом деформации щетки  $\Delta Y$  силы  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  для материалов В95пчТ2 и ВТ20 увеличиваются.

Обе составляющие  $P_{yn}$  и  $P_{y\delta}$  силы  $P_x$  с увеличением деформации  $\Delta Y$  растут. Рост составляющей  $P_{yn}$  связан с деформацией ворсины  $W_z$  (см. уравнения (5.11), (5.13) и (5.14)), а  $W_z$ , в свою очередь, зависит от  $\Delta Y$  (см. уравнения (5.6) и (5.7)). Ударная составляющая  $P_{y\delta}$  также связана с деформацией ворсины  $W_z$  (см. уравнения (5.29), (5.30) и 5.31)).

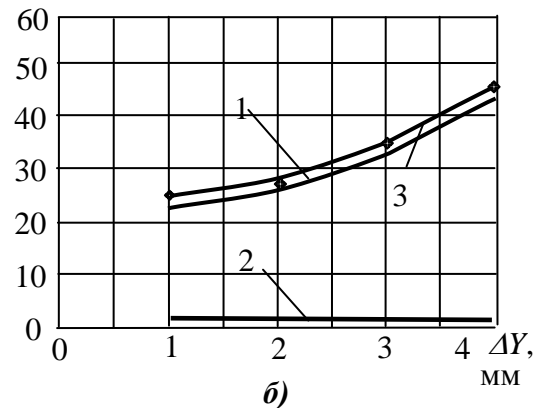
Упругая составляющая  $P_{yn}$  силы  $P_y$  с увеличением  $\Delta Y$  падает в связи с увеличением деформации ворсины  $W_z$  (см. уравнения (5.16) и (5.18)). Ударная составляющая  $P_{y\delta}$  силы  $P_y$  в соответствии с уравнениями (5.32), (5.33) и (5.34) связана с силой  $P_z$ , которая зависит от скорости удара.

Обе составляющие  $P_{yn}$  и  $P_{y\delta}$  силы  $P_z$  с увеличением деформации  $\Delta Y$  растут. Рост упругой составляющей  $P_{yn}$  силы  $P_z$  легко проследить по уравнениям (5.6), (5.7) и (5.12). Ударная составляющая  $P_{y\delta}$  силы  $P_z$  растет в соответствии с уравнениями (5.26), (5.27), и (5.28).

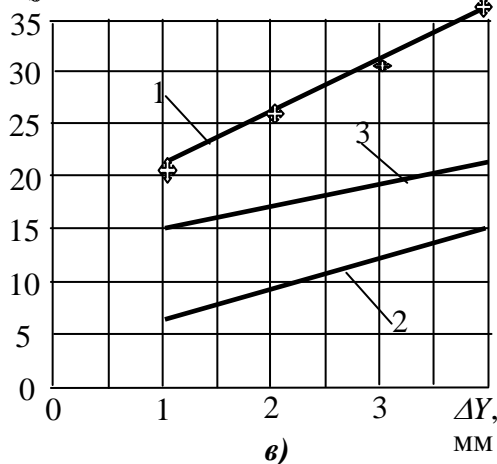
$P_y, H$



$P_x, H$



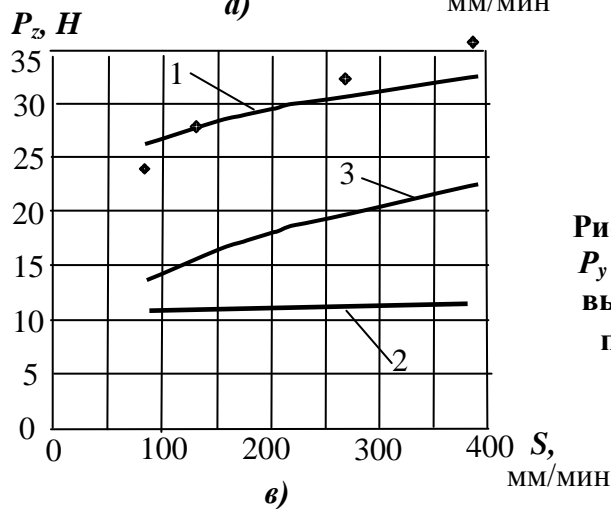
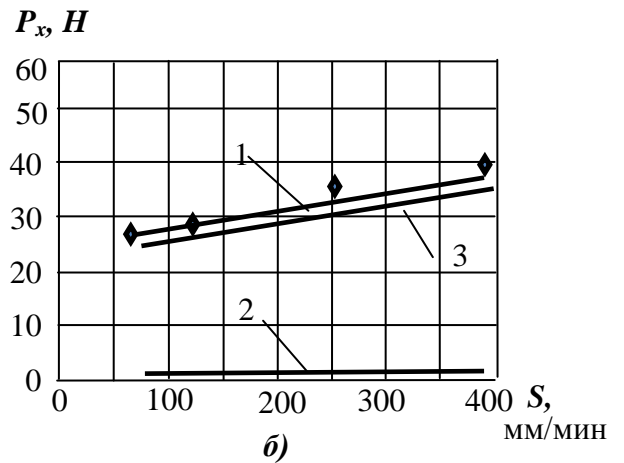
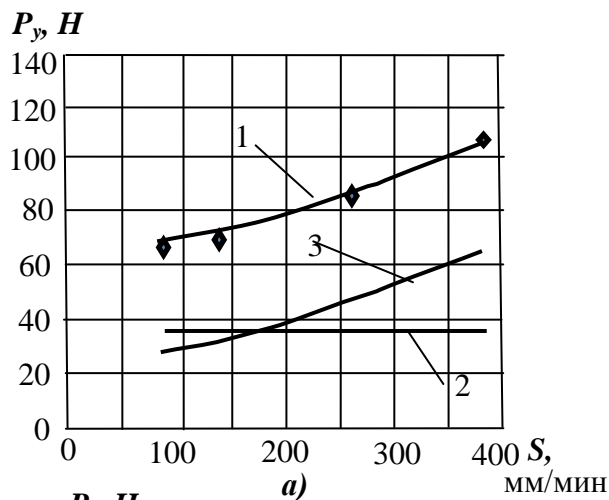
$P_z, H$



- 1 – суммарная сила;
- 2 – упругая составляющая;
- 3 – ударная составляющая.

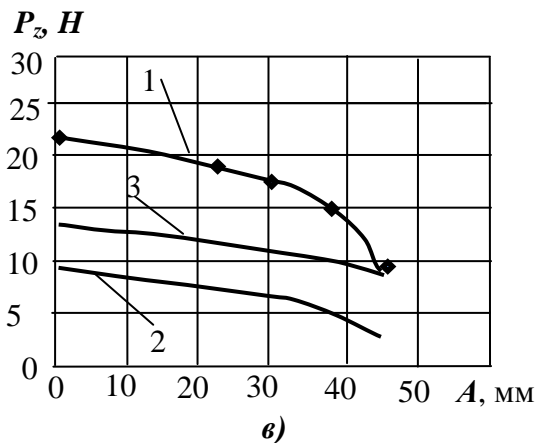
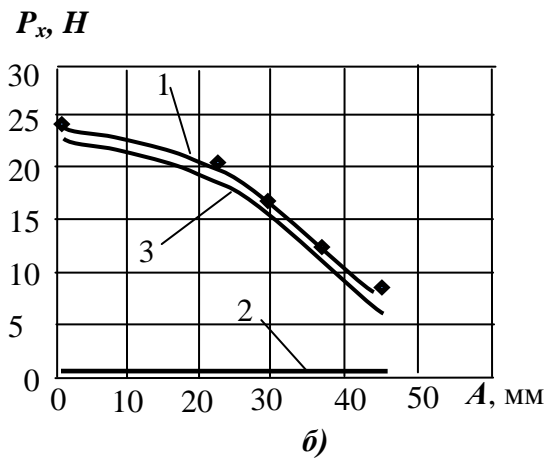
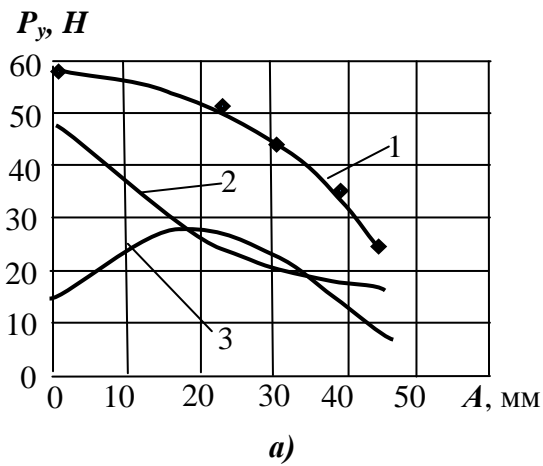
**Рисунок 5.10 – Зависимости сил резания  $P_y$  (а),  $P_x$  (б) и  $P_z$  (в) от деформации щетки для торцевых щеток ВД-ЗВ, материала В95пчТ2 при  $S = 130$  м/мин,  $n = 1600$  об/мин,  $A = 0$**

С увеличением подачи вдоль кромки  $S$  силы  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  и их составляющие  $P_{yn}$  и  $P_{y\delta}$  растут (см. таблицы В.5, В.6 приложения В и рисунок 5.11). Это также легко объясняется зависимостями, приведенными в разработанных теоретических положениях.



- 1 – суммарная сила;
- 2 – упругая составляющая;
- 3 – ударная составляющая.

**Рисунок 5.11 – Зависимости сил резания  $P_y$  (а),  $P_x$  (б) и  $P_z$  (в) от подачи для торцевых щеток ВД-ЗВ, материала В95пчТ2 при  $\Delta Y = 2$  мм,  $n = 1600$  об/мин,  $A = 0$**



- 1 – суммарная сила;
- 2 – упругая составляющая;
- 3 – ударная составляющая.

**Рисунок 5.12 – Зависимости сил резания  $P_y$  (а),  $P_x$  (б) и  $P_z$  (в) от смещения щетки для торцевых щеток ВД-ЗВ, материала В95пчТ2 при  $S = 82$  мм/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм,  $A = 0$**



Суммарная сила  $P_x$  (уравнение (5.41)) и ее ударная составляющая (уравнение (5.40)) с увеличением смещения щетки  $A$  уменьшаются (см. таблицы В.7 и В.8 и рисунок 5.12). Это объясняется уменьшением скорости по оси  $X$  и угла  $\delta$  (таблица 5.5). При этом упругая составляющая остается неизменной (уравнение (5.36)). Суммарная сила  $P_y$  (по уравнению (5.42)) и ее упругая составляющая (по уравнению (5.37)) с увеличением смещения щетки  $A$  падает. Это связано с уменьшением скорости удара ворсин и угла  $\delta$ . Упругая составляющая силы  $P_z$  (уравнение (5.35)), ударная составляющая (уравнение (5.38)) и суммарная сила  $P_z$  (уравнение (5.39)) с увеличением  $A$  падают, что связано с уменьшением скорости и угла  $\delta$  (см. таблицу 5.5).

**Таблица 5.5 – Средняя скорость и угол удара в зависимости от смещения щетки  $A$**

Показатель	$A$ , мм					
	0	14	22	30	38	46
$V_{cp}$ , м/с	4,314	5,487	6,158	6,828	7,498	8,168
$\delta$ , °	90	64,692	53,227	42,592	31,879	19,337

В целом можно констатировать, что силы, рассчитанные теоретически, хорошо коррелируют с экспериментальными данными. Доверительные границы отклонений экспериментальных от теоретически полученных данных при доверительной вероятности  $P=0,95$  определены в соответствии с методикой, описанной в п. 2.5 и приведены в таблице 5.6.

**Таблица 5.6 – Доверительные границы отклонений теоретически рассчитанных сил резания и статистически обработанных экспериментальных данных**

Составляющая силы	Доверительные границы, Н	
	Материал В95пчТ2	Материал ВТ20
$P_x$	$\pm 0,375$	$\pm 0,514$
$P_y$	$\pm 1,34$	$\pm 1,865$
$P_z$	$\pm 0,779$	$\pm 0,436$

В производственных условиях, разработанные теоретические модели могут быть использованы при наличии соответствующего программного обеспечения, при его отсутствии рекомендовано использование упрощенных зависимостей, полученных путем аппроксимации данных, рассчитанных теоретически. Для исследованных в настоящей работе торцевых полимерно-абразивных щеток, такие зависимости (В.1) приведены в приложении В (см. п. В.2).

Зная механические свойства полимерно-абразивного материала и размеры ворсин щетки, по разработанной математической модели можно определить все составляющие силы резания. При разработке технологических процессов это позволяет обоснованно выбрать оборудование для выполнения данной финишной операции или дать рекомендации по проектированию специального оборудования.

Разработанную математическую модель силового взаимодействия ворсин торцевых полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой кромкой, которая является подсистемой третьего уровня, следует считать устойчивой в связи с тем, что воздействие возмущающих факторов (входных параметров) корректируется системой управления, рассмотренной в п. 2.1.2.

### 5.1.3 Производительность процесса обработки при скруглении кромок торцевыми полимерно-абразивными щетками

Для обоснованного выбора инструмента и параметров обработки необходимы знания об их влиянии на процесс формирования обрабатываемой кромки.

Исследование выполнялось экспериментальными методами с использованием щеток компании 3М марок Scotch-Brite™ Bristle BD-ZB и Scotch-Brite™ Bristle RD-ZB различной зернистости (см. рисунок 2.12).

Эскиз щеток Scotch-Brite™ Bristle BD-ZB, на которых проведены экспериментальные исследования, приведен на рисунке 5.1.

Обработка кромки производилась по схеме, приведенной на рисунке 5.13. В качестве параметров производительности процесса принято среднее арифметическое по измеренным значениям  $X$  и  $Y$  (см. рисунок 5.13):  $Z_k = 0,5(X + Y)$ .

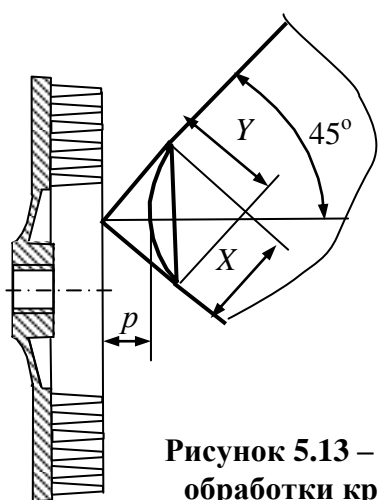


Рисунок 5.13 – Схема обработки кромки

Этот параметр удобен для практической оценки состояния кромки в процессе обработки. Вторым параметром производительности принята величина притупления кромки  $p$ . Это обусловлено тем, что кромка, полученная при обработке торцевыми щетками отличается по форме от кромки, полученной радиальными щетками.

Величины  $X$ ,  $Y$  и  $p$  в производственных условиях легко можно измерить с помощью лупы Бринелля.

#### Обработка кромок по оси щетки ( $A = 0$ )

Исследования проводились на образцах из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2 и титанового сплава ВТ20 (см. рисунок 2.13) на универсально-фрезерном станке (см. рисунок 2.17) щетками, параметры которых приведены в таблице 5.1. Измерения размеров кромки

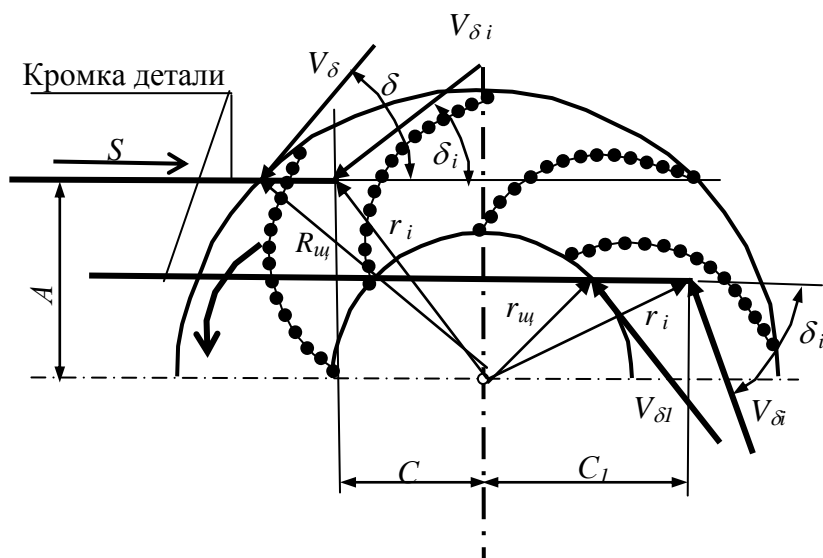


Рисунок 5.14 – Схема к определению количества ворсин, участвующих во взаимодействии с кромкой детали

выполнялись на большом инструментальном микроскопе БМИ-1Ц с точностью 1 мкм (см. рисунок 2.22).

При обработке по всей длине кромки, ворсины левой части щетки воздействуют на кромку перпендикулярно сверху вниз (рисунок 5.14), а при вступлении в процесс резания правой части ворсины действуют на кромку снизу вверх.

Результаты экспериментального исследования влияния режимных параметров обработки: частоты вращения щетки  $n$ , осевой деформации  $\Delta Y$  и подачи вдоль кромки  $S$  приведены в таблицах В.10 – В.12 приложения В и на рисунках 5.15 – 5.17.

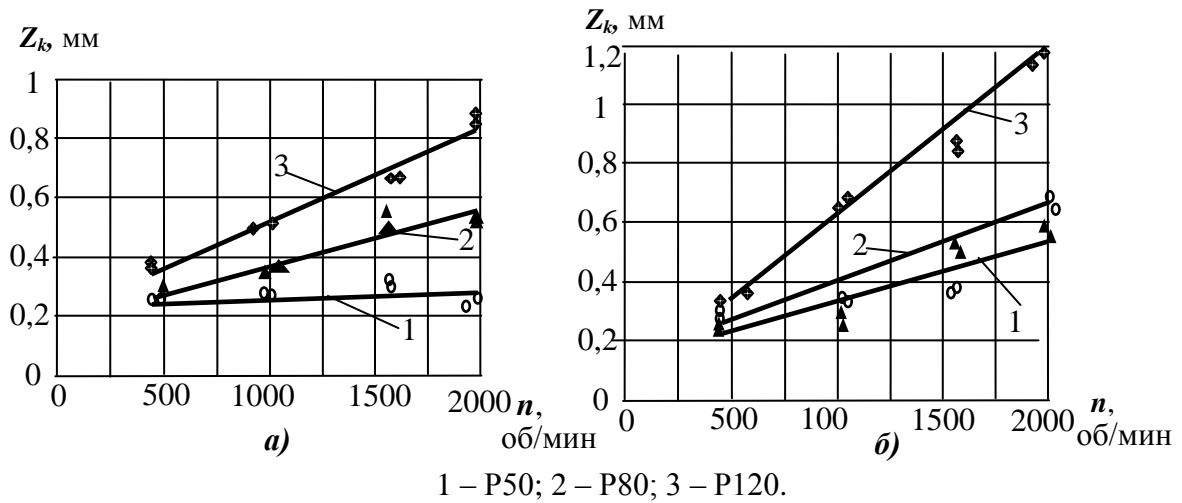


Рисунок 5.15 – Зависимости  $Z_k$  от частоты вращения  $n$  для торцевых щеток ВД-ЗВ при  $\Delta Y = 2$  мм: а – материал В95пчТ2, подача  $S = 130$  мм/мин; б – материал ВТ20 подача  $S = 42$  мм/мин

Установлено, что с увеличением частоты вращения (рисунок 5.15 и таблица В.10 приложения В) и осевой деформации щетки (рисунок 5.16 и таблица В.11 приложения В), производительность процесса растет. Это объясняется ростом силы, действующей на обрабатываемую кромку.

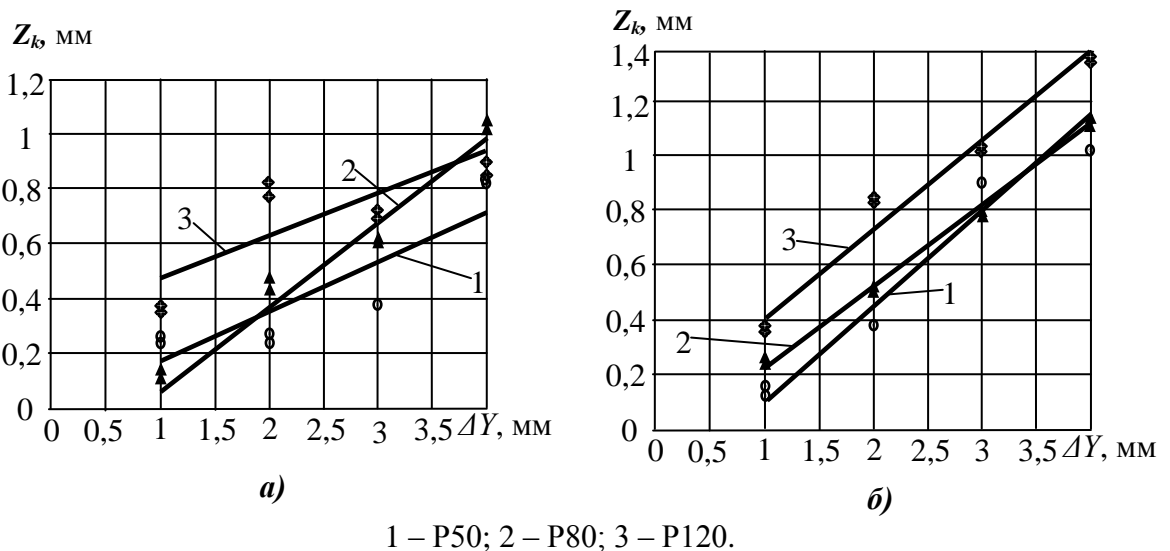
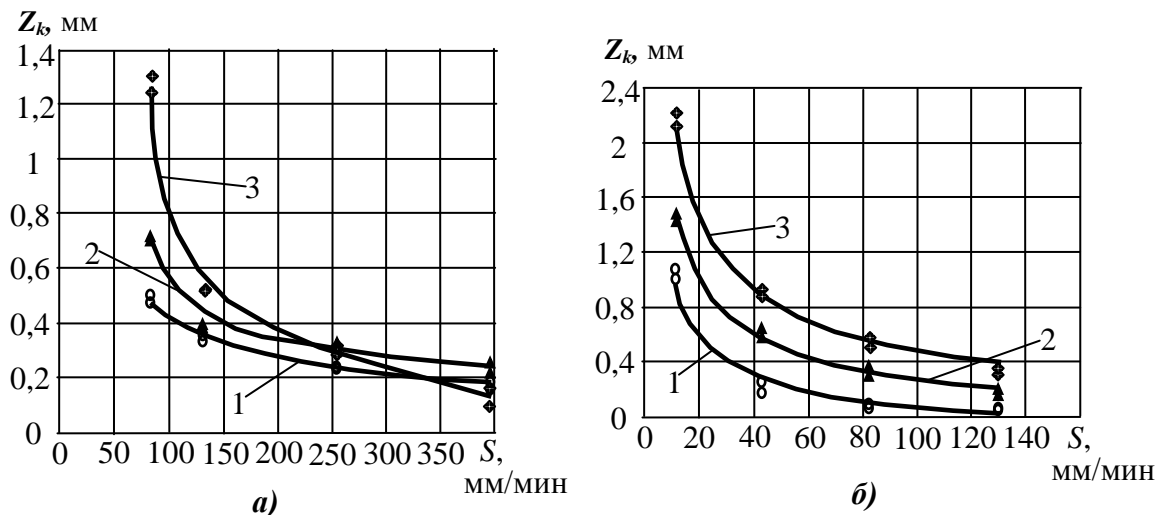


Рисунок 5.16 – Зависимости  $Z_k$  от деформации инструмента  $\Delta Y$  для торцевых щеток ВД-ЗВ при  $n = 1600$  об/мин: а – материал В95пчТ2, подача  $S=130$  мм/мин; б – материал ВТ20 подача  $S=42$  мм/мин

Как видно из рисунка 5.17 и таблицы В.12 приложения В, с увеличением подачи при неизменных частоте вращения и деформации, размер кромки уменьшается по нелинейной зависимости. Это объясняется непропорциональностью размера кромки и объемом снятого материала: при увеличении размеров  $X$  и  $Y$  на единицу длины прирост объема снятого материала увеличивается.



1 – P50; 2 – P80; 3 – P120.

**Рисунок 5.17 – Зависимости  $Z_k$  от подачи  $S$  для торцевых щеток BD-ZB при  $n = 1600$  об/мин,  $\Delta Y = 2$  мм: а – материал В95пчТ2; б – материал BT20**

Заключение о значимости влияния рассматриваемого фактора  $\Delta Y$ ,  $n$  и  $S$  на величину  $Z_k$  получено с использованием критерия Фишера (см. п. 2.5.2).  $F_{0,95}$  – критерий Фишера при доверительной вероятности 0,95. Этот критерий при степенях свободы  $f_1 = k - 1 = 3$  и  $f_2 = k(n - 1) = 8$  по справочным данным [199] равен  $F_{0,95} = 4,1$ .

Доверительные границы определены как  $\pm S_0 \cdot t$ , где  $t$  – квантиль Стьюдента. При количестве степеней свободы 11:  $t = 2,20$  (таблица 5.7).

**Таблица 5.7 – Результаты дисперсионного анализа зависимостей величины  $Z_k$  от частоты вращения  $n$ , деформации инструмента  $\Delta Y$  и подачи вдоль кромки  $S$**

Марка торцевой щетки	Обрабатываемый материал	Функция	$S_A^2, \text{мм}^2$	$S_0^2, \text{мм}^2$	$F=S_A^2/S_0^2$	Значимость влияния фактора	Доверительные границы $S_0 \cdot t, \text{мм}$
BD-ZB P50	B95ПчТ2	$Z_k = f(\Delta Y)$	0,10963	$6,53 \cdot 10^{-4}$	167,889	значимо	$\pm 0,05622$
		$Z_k = f(n)$	$4,94 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-5}$	470,624	значимо	$\pm 7,129 \cdot 10^{-3}$
		$Z_k = f(S)$	0,02878	$7,61 \cdot 10^{-5}$	378,183	значимо	$\pm 0,01919$
	BT20	$Z_k = f(\Delta Y)$	0,39101	$6,84 \cdot 10^{-5}$	5715,171	значимо	$\pm 0,0182$
		$Z_k = f(n)$	0,06773	$2,86 \cdot 10^{-5}$	2369,402	значимо	$\pm 0,011762$
		$Z_k = f(S)$	0,23649	$7,97 \cdot 10^{-5}$	2965,403	значимо	$\pm 0,01965$
BD-ZB P80	B95ПчТ2	$Z_k = f(\Delta Y)$	0,29459	$1,19 \cdot 10^{-3}$	248,7	значимо	$\pm 0,07572$
		$Z_k = f(n)$	0,096133	$1,3 \cdot 10^{-5}$	7394,827	значимо	$\pm 7,932 \cdot 10^{-3}$
		$Z_k = f(S)$	0,02084	$9,75 \cdot 10^{-6}$	2137,231	значимо	$\pm 6,869 \cdot 10^{-3}$
	BT20	$Z_k = f(\Delta Y)$	0,43687	$1,96 \cdot 10^{-4}$	2227,997	значимо	$\pm 0,03081$
		$Z_k = f(n)$	0,15497	$3,33 \cdot 10^{-5}$	4660,678	значимо	$\pm 0,01269$
		$Z_k = f(S)$	0,15941	$2,27 \cdot 10^{-4}$	702,516	значимо	$\pm 0,03314$
BD-ZB P120	B95ПчТ2	$Z_k = f(\Delta Y)$	0,04968	$4,36 \cdot 10^{-4}$	113,961	значимо	$\pm 0,04593$
		$Z_k = f(n)$	0,16049	$7,63 \cdot 10^{-4}$	210,4575	значимо	$\pm 0,06075$
		$Z_k = f(S)$	0,27	$3,22 \cdot 10^{-4}$	837,787	значимо	$\pm 0,0395$
	BT20	$Z_k = f(\Delta Y)$	0,6245	$1,12 \cdot 10^{-3}$	559,251	значимо	$\pm 0,07352$
		$Z_k = f(n)$	0,44511	$8,46 \cdot 10^{-4}$	525,977	значимо	$\pm 0,064$
		$Z_k = f(S)$	0,65429	$2,1 \cdot 10^{-4}$	3109,5	значимо	$\pm 0,03191$

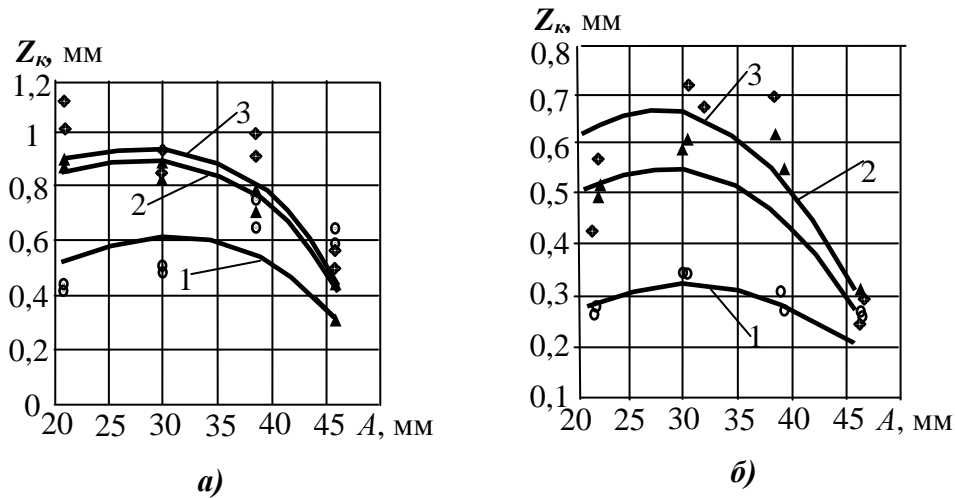
**Обработка кромок при смещенном положении кромки относительно оси щетки ( $A > 0$ )**

Производительность процесса формирования кромки зависит от расположения щетки относительно обрабатываемой кромки (размер  $A$  по рисунку 5.14), количества ворсин, участвующих во взаимодействии с обрабатываемой поверхностью, и от направления воздействия ворсины на обрабатываемую кромку (угол  $\delta$ ).

На рисунке 5.14 приведена схема для определения количества ворсин и скорости движения.

Зависимости производительности процесса  $Z_k$  от параметра  $A$  приведены на рисунке 5.18.

Количество ворсин, участвующих в работе, зависит от положения щетки относительно обрабатываемой кромки по размеру  $A$  – в горизонтальном направлении (см. рисунок 5.14) и размеров  $C$  и  $C_l$  – в вертикальном направлении.



1 – P50; 2 – P80; 3 – P120.

**Рисунок 5.18 – Зависимость  $Z_k$  от смещения относительно оси  $A$  для щеток BD-ZB при  $n=1600$  об/мин,  $\Delta Y=1,5$  мм,  $S=82$  мм/мин: а – материал B95пчТ2; б – материал BT20**

При этом количество ворсин пропорционально площади рабочей части щетки  $Q_i$ , участвующей в работе:  $N_i = Q_i \cdot N_1$ ,

где  $N_1$  – количество ворсин на единице площади:  $N_1 = \frac{N_{\text{общ}}}{Q_{\text{общ}}} = \frac{540}{5215} \approx 0,1 \frac{\text{шт}}{\text{мм}^2}$ ,

где  $N_{\text{общ}}$  – общее количество ворсин на щетке;

$Q_{\text{общ}}$  – общая площадь рабочей части щетки:  $Q_{\text{общ}} = \pi(R_{\text{щ}}^2 - r_{\text{щ}}^2) = 5215 \text{ мм}^2$ .

В пределах рабочей части щетки Scotch-Brite™ BD-ZB  $\varnothing 115$  мм, радиус колеблется в пределах от  $R_{\text{щ}} = 51,5$  мм до  $r_{\text{щ}} = 31,5$  мм.

При входе щетки в процесс обработки кромки количество ворсин определится по формулам:

- для  $C_i$  от  $R_{\text{щ}} = 51,5$  мм до  $r_{\text{щ}} = 31,5$  мм.:  $N_i = \pi(R_{\text{щ}}^2 - C_i^2 - A_i^2) \cdot N_1$ ; (5.43)

- для  $C_i$  от  $r_{\text{щ}} = 31,5$  мм до 0:  $N_i = \pi(R_{\text{щ}}^2 - r_{\text{щ}}^2) \cdot N_1$ . (5.44)

Если радиус точки начала обрабатываемой кромки:  $r_i = \sqrt{C_i^2 + A_i^2} \leq 31,5$  мм,

то  $N_i = 540$  шт. Если  $r_i = \sqrt{C_i^2 + A_i^2} \geq 51,5$  мм, то  $N_i = 0$ .

При этом процесс резания ворсинами (см. рисунок 5.14) происходит в направлении сверху вниз. После перехода через ось щетки ( $C_i = 0$ ), процесс резания будет происходить снизу вверх. Количество ворсин, дополнительно участвующих в обработке, определится по формулам:

- для  $C_i^l$  от 0 до  $r_{щ} = 31,5$  мм:  $N_i = \pi(R_{щ}^2 - r_{щ}^2) \cdot N_l$ ; (5.45)

- для  $C_i^l$  от  $r_{щ} = 31,5$  мм до  $R_{щ} = 51,5$  мм:  $N_i = \pi((C_{li})^2 + A^2 - r_{щ}^2) \cdot N_l$ . (5.46)

Если  $r_i = \sqrt{(C_{1i})^2 + A^2} \leq 31,5$  мм, то  $N_i = 0$ .

Если  $r_i = \sqrt{(C_{1i})^2 + A^2} \geq 51,5$  мм, то  $N_i = 540$  шт.

Пример расчета количества ворсин по формулам (5.43–5.46), участвующих в работе, в соответствии с рисунком 5.14, приведен в таблице 5.8. Жирными линиями выделены зоны, в которых участвуют либо все ворсины (540), либо их нет.

**Таблица 5.8 – Количество ворсин, участвующих в работе**

C, мм	C <sub>l</sub> , мм	A, мм					
		0	14	22	30	38	46
<b>При входе щетки в процесс обработки кромки от C = R<sub>щ</sub> до C = 0</b>							
<b>46</b>		168,47	106,89	16,41	0	0	0
<b>38</b>		379,58	318,00	227,53	96,84	0	0
<b>30</b>		540	448,91	398,43	267,74	96,84	0
<b>22</b>		540	540	540	398,43	227,53	16,41
<b>14</b>		540	540	540	488,91	318,01	106,89
<b>0</b>		540	540	540	540	379,58	168,47
<b>При входе щетки в процесс обработки кромки от C<sub>l</sub> = 0 до C<sub>l</sub> = R<sub>щ</sub></b>							
	<b>14</b>	0	0	0	32,59	203,50	414,61
	<b>22</b>	0	0	0	123,07	293,97	505,09
	<b>30</b>	0	32,59	123,07	253,76	424,66	540
	<b>38</b>	141,92	203,50	293,97	424,66	540	540
	<b>46</b>	353,04	414,61	505,09	540	540	540
	<b>51,5</b>	540	540	540	540	540	540

**Направление и скорость воздействия ворсины на обрабатываемую кромку**

На обрабатываемую кромку, находящуюся в зоне резания, ворсины действуют под разными углами и с разными скоростями. Для расчета воспользуемся средними значениями.

Для зоны резания при  $C \geq 0$ ,  $A \geq r_{щ}$ ,  $r_i \leq R_{щ}$ .

Средняя скорость равна:  $V_{cp} = \frac{\pi \cdot n}{1000 \cdot 60} (R_{щ} + r_i)$ . (5.47)

Средний угол равен:  $\delta_{cp} = \arccos \frac{2A}{R_{щ} + r_i}$ . (5.48)

Для зоны резания при  $C_l \geq 0$ ,  $A \geq r_{щ}$ ,  $r_i \leq R_{щ}$ .

Средняя скорость равна:  $V_{cp} = \frac{\pi \cdot n}{1000 \cdot 60} (A + r_i)$ . (5.49)

Средний угол равен:  $\delta_{cp} = \arccos \frac{2A}{A + r_i}$ . (5.50)

Для зоны резания при  $C \geq 0, A \leq r_{щ}, r_i \leq R_{щ}$ .

$$\text{Средняя скорость равна: } V_{cp} = \frac{\pi \cdot n}{1000 \cdot 60} (R_{щ} + r_i). \quad (5.51)$$

$$\text{Средний угол равен: } \delta_{cp} = \arccos \frac{2A}{R_{щ} + r_i}. \quad (5.52)$$

Для зоны резания при  $C_I \geq 0, A \leq r_{щ}, r_i \leq R_{щ}$ .

$$\text{Средняя скорость равна: } V_{cp} = \frac{\pi \cdot n}{1000 \cdot 60} (r_{щ} + r_i). \quad (5.53)$$

$$\text{Средний угол равен: } \delta_{cp} = \arccos \frac{2A}{r_{щ} + r_i}. \quad (5.54)$$

В таблице 5.9 приведены средние значения скоростей и угла воздействия ворсин, рассчитанные по формулам (5.47–5.54).

**Таблица 5.9 – Направление и скорость воздействия ворсины на обрабатываемую кромку при  $n = 1600$  об/мин**

Параметр	C, мм	C <sub>I</sub> , мм	A, мм						
			0	14	22	30	38	46	
<b>При входе щетки в процесс обработки кромки от C = R<sub>щ</sub> до C = 0</b>									
V <sub>cp</sub> , м/с	46		8,168	8,343	8,586				
δ, °			90	73,67	64,576				
V <sub>cp</sub> , м/с	38		7,498	7,707	7,993	8,37			
δ, °			90	72,28	62,537	53,094			
V <sub>cp</sub> , м/с	30		6,828	7,088	7,431	7,869	8,37		
δ, °			90	70,674	60,261	50,298	40,479		
V <sub>cp</sub> , м/с	22		6,158	6,499	6,921	7,431	7,993	8,568	
δ, °			90	68,843	57,818	47,435	37,196	26,149	
V <sub>cp</sub> , м/с	14		5,487	5,973	6,499	7,088	7,707	8,343	
δ, °			90	66,877	55,446	44,833	34,298	22,504	
V <sub>cp</sub> , м/с	0		4,314	5,487	6,158	6,828	7,498	8,168	
δ, °			90	64,692	53,227	42,592	31,879	19,337	
<b>При входе щетки в процесс обработки кромки от C<sub>I</sub> = 0 до C<sub>I</sub> = R<sub>щ</sub></b>									
V <sub>cp</sub> , м/с		14				5,287	6,576	7,882	
δ, °						18,051	14,49	12,079	
V <sub>cp</sub> , м/с		22				5,63	6,862	8,125	
δ, °						26,769	21,897	18,459	
V <sub>cp</sub> , м/с		30		3,946	4,96	6,068	7,239	8,454	
δ, °				53,53	41,994	34,062	28,421	24,268	
V <sub>cp</sub> , м/с		38	5,822	6,032	6,317	6,695	7,141	7,638	
δ, °			90	67,114	54,304	41,34	26,925		
V <sub>cp</sub> , м/с		46	6,493	6,667	6,911	7,24	7,638	8,089	
δ, °			90	69,4	57,765	46,029	33,525	17,667	
V <sub>cp</sub> , м/с		51,5	6,953	7,11	7,331	7,632	8,001	8,424	
δ, °			90	70,736	59,812	48,806	37,27	23,801	

Экспериментальные зависимости размера обработанной кромки от величины ее смещения A относительно оси щетки приведены на рисунке 5.18. Установлено, что в пределах  $A \leq 31,5$  мм, когда в работе участвуют все 540 ворсин, размер кромки увеличивается. С дальнейшим увеличением A, кромка уменьшается и достигает нуля (при  $A = 51,5$  мм).

Рост производительности процесса с увеличением параметра  $A$  связан с ростом работы перемещения ворсины при ее взаимодействии с обрабатываемой кромкой:  $F = L_{\Pi} \cdot P_{xyz}$ , (5.55) где  $L_{\Pi}$  – перемещение ворсины относительно кромки, м;

$$P_{xyz} - \text{равнодействующая составляющих сил резания, Н: } P_{xyz} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}. \quad (5.56)$$

При  $\delta = 90^\circ$  перемещение равно  $L_{\Pi} = \Delta Y$ . С уменьшением угла перемещение увеличивается и равно  $L_{\Pi} = \Delta Y / \sin \delta_{cp}$ .

Экспериментальные данные по силам были получены на универсально-фрезерном станке марки Deckel Maho DMC 635V (см. рисунок 2.17) с использованием трехкомпонентного динамометра фирмы Kistler (Швейцария) модели 9253B23 (см. рисунок 2.25).

Результаты исследования сил приведены в таблицах 5.10 и 5.11.

**Таблица 5.10 – Силы резания при обработке материала В95пчТ2**

при  $n = 1600$  об/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм,  $S = 82$  мм/мин

$A$ , мм	Щетка BD-ZB P120			Щетка BD-ZB P80			Щетка BD-ZB P50		
	$P_z$ , Н	$P_x$ , Н	$P_y$ , Н	$P_z$ , Н	$P_x$ , Н	$P_y$ , Н	$P_z$ , Н	$P_x$ , Н	$P_y$ , Н
0	26,97	24,38	92,65	23,75	24,51	37,32	15,09	24,56	48,5
22	25,3	20,09	78,68	20,39	20,22	32,55	13,68	20,02	41,8
30	23,97	17,33	67,6	17,6	17,46	29,37	12,69	17,06	36,96
38	22,26	13,93	53,32	13,99	14,06	25,43	11,44	13,38	30,84
46	20,16	9,89	35,84	9,54	10,02	20,72	9,94	9,01	23,44

**Таблица 5.11 – Силы резания при обработке материала ВТ20**

при  $n = 1600$  об/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм,  $S = 42$  мм/мин

$A$ , мм	Щетка BD-ZB P120			Щетка BD-ZB P80			Щетка BD-ZB P50		
	$P_z$ , Н	$P_x$ , Н	$P_y$ , Н	$P_z$ , Н	$P_x$ , Н	$P_y$ , Н	$P_z$ , Н	$P_x$ , Н	$P_y$ , Н
0	14,89	37,0	67,98	17,51	28,4	56,55	24,13	35,69	68,85
22	15,27	33,92	102,76	16,32	25,08	53,48	21,5	31,64	62,15
30	14,36	32,2	101,04	15,41	23,14	51,76	19,34	29,09	57,31
38	13,19	30,16	99	14,24	20,84	49,72	16,54	25,96	51,19
46	11,77	27,8	96,64	12,82	18,14	47,36	13,1	22,26	43,79

**Таблица 5.12 – Размер кромки и работа перемещения ворсины**

$A$ , мм	Материал В95пчТ2						Материал ВТ20					
	Щетка BD-ZB P120		Щетка BD-ZB P80		Щетка BD-ZB P50		Щетка BD-ZB P120		Щетка BD-ZB P80		Щетка BD-ZB P50	
	$Z_k$ , мм	$F$ , Н·м	$Z_k$ , мм	$F$ , Н·м	$Z_k$ , мм	$F$ , Н·м	$Z_k$ , мм	$F$ , Н·м	$Z_k$ , мм	$F$ , Н·м	$Z_k$ , мм	$F$ , Н·м
0	0,745	78,17	0,415	33,05	0,321	37,56	0,605	62,23	0,432	53,07	0,305	64,31
22	0,89	83,62	0,85	42,67	0,479	47,51	0,648	107,44	0,506	60,25	0,299	71,75
30	0,92	85,86	0,88	44,44	0,593	49,62	0,672	124,52	0,552	68,37	0,32	78,10
38	0,795	64,08	0,749	34,77	0,569	38,28	0,586	112,48	0,498	60,11	0,304	64,40
46	0,441	32,28	0,398	19,01	0,309	20,61	0,317	77,27	0,277	39,92	0,218	38,80
51,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Результаты расчета работы перемещения ворсины при ее взаимодействии с обрабатываемой кромкой по формулам (5.55) и (5.56) с использованием данных таблиц 5.10 и 5.11 приведены в таблице 5.12, из которой видно, что производительность процесса (размер  $Z_k$  кромки) и работа  $F$  тесно коррелируют между собой. Следовательно, закономерности влияния положения обрабатываемой кромки относительно оси щетки (размер  $A$ ) на размер обработанной кромки  $Z_k$  (см. рисунок 5.18), имеющие экстремальный характер, убедительно подтверждаются результатами расчета.

По результатам экспериментов и после статистической обработки данных (см. п. 2.5) получена зависимость размера обработанной кромки от всех режимных параметров обработки ( $\Delta Y$ ,  $n$ ,  $S$  и  $A$ ):

$$Z_k = a_1 \cdot \Delta Y^2 + a_2 \cdot n^2 + a_3 \cdot S^2 + a_4 \cdot A^2 + a_5 \cdot \Delta Y + a_6 \cdot n + a_7 \cdot S + a_8 \cdot A + a_9 \cdot \Delta Y \cdot n + a_{10} \cdot \Delta Y \cdot S + a_{11} \cdot \Delta Y \cdot A + a_{12} \cdot n \cdot S + a_{13} \cdot n \cdot A + a_{14} \cdot S \cdot A + a_{15} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot S + a_{16} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot A + a_{17} \cdot S \cdot n \cdot A + a_{18} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot S \cdot A + a_{19}. \quad (5.57)$$

Значения коэффициентов и свободного члена приведены в таблице 5.13.

**Таблица 5.13 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (5.57)**

Коэффициент и свобод. член	Щетка BD-ZB Bristle™ P50		Щетка BD-ZB Bristle™ P80		Щетка BD-ZB Bristle™ P120	
	B95ПчТ2	BT20	B95ПчТ2	BT20	B95ПчТ2	BT20
$a_1$	0,0257133	0,0466667	0,0175	0,057971	-0,01	-0,04
$a_2$	$2,327 \cdot 10^{-8}$	$1,232 \cdot 10^{-7}$	$6,83 \cdot 10^{-8}$	$1,359 \cdot 10^{-7}$	$1,316 \cdot 10^{-7}$	$2,108 \cdot 10^{-7}$
$a_3$	$3 \cdot 10^{-6}$	$7,05 \cdot 10^{-5}$	$-7,5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$
$a_4$	$1,372 \cdot 10^{-5}$	$9,143 \cdot 10^{-6}$	$2,743 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$1,829 \cdot 10^{-5}$	$9,143 \cdot 10^{-6}$
$a_5$	$2,343 \cdot 10^{-3}$	0,048145	$1,464 \cdot 10^{-3}$	$6,14 \cdot 10^{-5}$	0,15	0,55
$a_6$	$3,572 \cdot 10^{-8}$	$-7 \cdot 10^{-5}$	$-5 \cdot 10^{-5}$	$3,106 \cdot 10^{-7}$	$2,849 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
$a_7$	$-2,3 \cdot 10^{-3}$	-0,0145	$-1 \cdot 10^{-4}$	-0,011428	$-3 \cdot 10^{-3}$	-0,023
$a_8$	$7 \cdot 10^{-3}$	$1,151 \cdot 10^{-3}$	$3,453 \cdot 10^{-3}$	$3,139 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$3,139 \cdot 10^{-3}$
$a_9$	$1,114 \cdot 10^{-7}$	$8,236 \cdot 10^{-9}$	$8,358 \cdot 10^{-5}$	$1,171 \cdot 10^{-8}$	$1,114 \cdot 10^{-9}$	$1,171 \cdot 10^{-8}$
$a_{10}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$7,391 \cdot 10^{-6}$	$4,167 \cdot 10^{-5}$	$1,89 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1,89 \cdot 10^{-9}$
$a_{11}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$	$2,112 \cdot 10^{-11}$	$1,191 \cdot 10^{-10}$	$1,056 \cdot 10^{-11}$	$2,857 \cdot 10^{-12}$	$1,056 \cdot 10^{-11}$
$a_{12}$	$1,875 \cdot 10^{-10}$	$-2,079 \cdot 10^{-7}$	$-1,406 \cdot 10^{-7}$	$-4,092 \cdot 10^{-10}$	$-1,055 \cdot 10^{-7}$	$-4,092 \cdot 10^{-10}$
$a_{13}$	$8,237 \cdot 10^{-9}$	$6,088 \cdot 10^{-10}$	$3,432 \cdot 10^{-9}$	$8,657 \cdot 10^{-10}$	$8,237 \cdot 10^{-11}$	$8,657 \cdot 10^{-10}$
$a_{14}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$	$-4,699 \cdot 10^{-10}$	$-2,649 \cdot 10^{-9}$	$-2,35 \cdot 10^{-10}$	$-6,358 \cdot 10^{-11}$	$-2,35 \cdot 10^{-10}$
$a_{15}$	$6,43 \cdot 10^{-9}$	$-8,768 \cdot 10^{-8}$	$2,679 \cdot 10^{-9}$	$-1,403 \cdot 10^{-10}$	$-9,645 \cdot 10^{-9}$	$-1,403 \cdot 10^{-10}$
$a_{16}$	$8,237 \cdot 10^{-9}$	$6,088 \cdot 10^{-10}$	$3,432 \cdot 10^{-9}$	$8,657 \cdot 10^{-10}$	$8,237 \cdot 10^{-11}$	$8,657 \cdot 10^{-10}$
$a_{17}$	$-2,313 \cdot 10^{-10}$	$-1,709 \cdot 10^{-11}$	$-9,636 \cdot 10^{-11}$	$-2,431 \cdot 10^{-11}$	$-2,313 \cdot 10^{-12}$	$-2,431 \cdot 10^{-11}$
$a_{18}$	$1,005 \cdot 10^{-11}$	$7,426 \cdot 10^{-13}$	$4,186 \cdot 10^{-12}$	$2,857 \cdot 10^{-12}$	$1,005 \cdot 10^{-13}$	$2,857 \cdot 10^{-12}$
$a_{19}$	0,36	0,42	0,105	0,33	0,42	0,05

Производительность процесса по параметру  $p$  (см. рисунок 5.13) исследована экспериментально по той же методике и с применением того же оборудования и измерительных средств, что и при исследовании вышеописанного параметра  $Z_k$ . Закономерности влияния режимных параметров обработки  $n$ ,  $\Delta Y$ ,  $S$  и  $A$  на производительность по показателю  $p$  аналогичны влиянию этих параметров на показатель  $Z_k$ . Зависимости производительности процесса по па-

раметру  $p$  от режимов обработки приведены в приложении В на рисунках В.1–В.4 и таблицах В.13–В.16.

По результатам экспериментов и после статистической обработки данных (согласно п. 2.5), получена зависимость размера обработанной кромки  $p$  от режимных параметров обработки ( $\Delta Y$ ,  $n$ ,  $S$  и  $A$ ):

$$p = a_1 \cdot \Delta Y^2 + a_2 \cdot n^2 + a_3 \cdot S^2 + a_4 \cdot A^2 + a_5 \cdot \Delta Y + a_6 \cdot n + a_7 \cdot S + a_8 \cdot A + a_9 \cdot \Delta Y \cdot n + a_{10} \cdot \Delta Y \cdot S + a_{11} \cdot \Delta Y \cdot A + a_{12} \cdot n \cdot S + a_{13} \cdot n \cdot A + a_{14} \cdot S \cdot A + a_{15} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot S + a_{16} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot A + a_{17} \cdot S \cdot n \cdot A + a_{18} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot S \cdot A + a_{19}. \quad (5.58)$$

Значения коэффициентов и свободного члена приведены в таблице 5.14.

**Таблица 5.14 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (5.58)**

Коэффициент и свобод. член	Щетка BD-ZB Bristle™ P50		Щетка BD-ZB Bristle™ P80		Щетка BD-ZB Bristle™ P120	
	В95ПчТ2	ВТ20	В95ПчТ2	ВТ20	В95ПчТ2	ВТ20
$a_1$	0,01	$8 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	-0,025	$5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-3}$
$a_2$	$6 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$
$a_3$	$-1 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$2,15 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$
$a_4$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$
$a_5$	0,025	0,048	0,015	0,23	0,03	0,06
$a_6$	$3 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-5}$
$a_7$	$-3,8 \cdot 10^{-4}$	$-6,1 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	$-7,8 \cdot 10^{-3}$	$-1,7 \cdot 10^{-3}$	$-6,7 \cdot 10^{-3}$
$a_8$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$
$a_9$	$1,114 \cdot 10^{-7}$	$8,236 \cdot 10^{-9}$	$1,114 \cdot 10^{-7}$	$8,236 \cdot 10^{-9}$	$1,114 \cdot 10^{-7}$	$8,236 \cdot 10^{-9}$
$a_{10}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$7,391 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$7,391 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$7,391 \cdot 10^{-6}$
$a_{11}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$	$2,112 \cdot 10^{-11}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$	$2,112 \cdot 10^{-11}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$	$2,112 \cdot 10^{-11}$
$a_{12}$	$1,875 \cdot 10^{-10}$	$-2,079 \cdot 10^{-7}$	$1,875 \cdot 10^{-10}$	$-2,079 \cdot 10^{-7}$	$1,875 \cdot 10^{-10}$	$-2,079 \cdot 10^{-7}$
$a_{13}$	$8,237 \cdot 10^{-9}$	$6,088 \cdot 10^{-10}$	$8,237 \cdot 10^{-9}$	$6,088 \cdot 10^{-10}$	$8,237 \cdot 10^{-9}$	$6,088 \cdot 10^{-10}$
$a_{14}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$	$-4,699 \cdot 10^{-10}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$	$-4,699 \cdot 10^{-10}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$	$-4,699 \cdot 10^{-10}$
$a_{15}$	$6,43 \cdot 10^{-9}$	$-8,768 \cdot 10^{-8}$	$6,43 \cdot 10^{-9}$	$-8,768 \cdot 10^{-8}$	$6,43 \cdot 10^{-9}$	$-8,768 \cdot 10^{-8}$
$a_{16}$	$8,237 \cdot 10^{-9}$	$6,088 \cdot 10^{-10}$	$8,237 \cdot 10^{-9}$	$6,088 \cdot 10^{-10}$	$8,237 \cdot 10^{-9}$	$6,088 \cdot 10^{-10}$
$a_{17}$	$-2,313 \cdot 10^{-10}$	$-1,709 \cdot 10^{-11}$	$-2,313 \cdot 10^{-10}$	$-1,709 \cdot 10^{-11}$	$-2,313 \cdot 10^{-10}$	$-1,709 \cdot 10^{-11}$
$a_{18}$	$1,005 \cdot 10^{-11}$	$7,426 \cdot 10^{-13}$	$1,005 \cdot 10^{-11}$	$7,426 \cdot 10^{-13}$	$1,005 \cdot 10^{-11}$	$7,426 \cdot 10^{-13}$
$a_{19}$	0,11	0,21	0,17	-0,01	0,255	0,18

#### 5.1.4 Качество обработанной кромки

##### *Отклонение месторасположения (позиционирование)*

Представляет собой (см. рисунок 5.13) относительное отклонение от симметричности расположения радиуса закругления:  $\delta = \frac{X-Y}{Z}$ ,

где  $X$ ,  $Y$  – координаты перехода конца закругления в прямую линию (см. рисунок 5.13);

$Z_k$  – средняя величина по осям  $X$  и  $Y$ , которая определяется по выражению:  $Z_k = \frac{X+Y}{2}$ .

В связи с тем, что на радиусы скругления предусмотрены допустимые предельные отклонения, на параметр  $\delta$  также имеются допуски (см. п. 4.1.4).

Эксперименты проводились при расположении образца под  $45^\circ$  относительно оси X.

Поскольку величина  $\delta$  является относительной, в таблице 5.15 приведены средние значения по всем щеткам. Как видно из результатов исследования, отклонение месторасположения кромки при всех параметрах обработки не выходит за пределы допустимых.

**Таблица 5.15 – Отклонение месторасположения кромки  $\delta$  при различных режимах обработки при  $A = 0$**

п, об/мин	В95пчТ2 при $\Delta Y=2$ мм, $S=130$ мм/мин	ВТ20 при $\Delta Y=2$ мм, $S=42$ мм/мин	$\Delta Y$ , мм	В95пчТ2 при $n=1600$ об/мин, $S=130$ мм/мин	ВТ20 при $n=1600$ об/мин, $S=42$ мм/мин	$S$ , мм/мин	В95пчТ2 при $n=1600$ об/мин, $\Delta Y=2$ мм	ВТ20 при $n=1600$ об/мин, $\Delta Y=2$ мм
500	-0,018	-0,054	1	-0,123	-0,328	13	–	-0,352
1000	-0,108	-0,109	2	-0,193	-0,166	42	–	-0,367
1600	-0,177	-0,189	3	-0,100	-0,094	82	-0,347	-0,124
2000	-0,28	-0,253	4	-0,195	-0,188	130	-0,231	-0,057
–	–	–	–	–	–	255	-0,142	–
–	–	–	–	–	–	395	-0,0765	–

### **Шероховатость обработанной кромки**

Шероховатость поверхности скругленных кромок должна соответствовать требованиям чертежа на обрабатываемые детали (например, для большинства деталей каркаса самолета, шероховатость обработанных поверхностей не должна превышать  $Ra$  3,2).

Измерение шероховатости на скругленных кромках образцов производилось на оптическом профилометре Bruker Contour GT-KI (Германия) (см. рисунок 2.24) согласно методике, изложенной п. Б.1 приложения Б. Установлено, что при всех исследованных режимных параметрах обработки, шероховатость колеблется в пределах  $Ra$  1,4 –  $Ra$  2,7 на образцах из В95пчТ2 и  $Ra$  0,7 –  $Ra$  3,0 – на образцах из ВТ20.

### **5.1.5 Температура в зоне обработки**

Полимерно-абразивные щетки, эффективно применяемые для финишной обработки поверхностей и кромок, со связкой из полимера очень чувствительны к температуре, возникающей в процессе обработки. Высокая температура может привести к оплавлению поверхностного слоя ворсин, что недопустимо. Поэтому при назначении режимов обработки необходимо учитывать температуру, возникающую при резании.

Теплообразование при обработке полимерно-абразивными щетками следует рассматривать как процесс, аналогичный теплообразованию, возникающему при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами, то есть осуществляющийся активными зернами, расположение которых на режущей поверхности инструмента подчинено вероятностным законам.

При обработке кромок торцевыми полимерно-абразивными щетками, температура в зоне резания исследована экспериментально при помощи высокоскоростной тепловизионной камеры

FLIR Orion SC7000M (Швеция) (см. рисунок 2.26).

При экспериментальном исследовании температуры в хоне обработки, образцы из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2 и титанового сплава ВТ20 с острыми кромками (см. рисунок 2.13) крепились в приспособлении и обрабатывались на универсально-фрезерном станке марки Deckel Maho DMC 635V (см. рисунок 2.17).

Результаты исследования температуры в зоне резания в зависимости от частоты вращения щетки  $n$ , деформации ворсин  $\Delta Y$ , подачи вдоль обрабатываемой кромки  $S$  и смещения кромки относительно оси щетки  $A$  приведены в таблицах В.17–В.20 приложения В.

Заключение о значимости влияния рассматриваемого фактора  $\Delta Y$ ,  $n$ ,  $S$  и  $A$  на величину температуры  $\Theta$  получено с использованием критерия Фишера (см. п. 2.5.2).  $F_{0,95}$  – критерий Фишера при доверительной вероятности 0,95. Этот критерий при степенях свободы  $f_1 = k - 1 = 3$  и  $f_2 = k(n - 1) = 8$  по справочным данным [199] равен  $F_{0,95} = 4,1$ .

Доверительные границы определены как  $\pm S_0 \cdot t$ , где  $t$  – квантиль Стьюдента. При количестве степеней свободы 11:  $t = 2,20$  (таблица 5.16).

При назначении режимов обработки недопустимо, чтобы температура резания оказалась выше температуры плавления полимерной связки щетки.

Если учесть, что температура плавления полимерных материалов составляет: полиамида-6 и капрона – 215 °С, полиуретана – 175 °С, полистирола 220 °С, следует сделать вывод о том, что приведенные в таблицах В.17–В.20 приложения В температуры в зоне резания существенно ниже допустимых.

Тем не менее, чтобы избежать в разрабатываемых технологических процессах назначения режимов обработки, при которых температура может оказаться выше допустимой, целесообразно проводить проверку температуры резания по уравнению (5.59).

**Таблица 5.16 – Результаты дисперсионного анализа зависимостей величины  $\Theta$  от частоты вращения  $n$ , деформации инструмента  $\Delta Y$ , подачи вдоль кромки  $S$  и смещения кромки  $A$**

Марка торцевой щетки	Обрабатываемый материал	Функция	$S_A^2, ^\circ C^2$	$S_0^2, ^\circ C^2$	$F=S_A^2/S_0^2$	Значимость влияния фактора	Доверительные границы $S_0 \cdot t, ^\circ C$
BD-ZB P50	В95ПчТ2	$\Theta = f(\Delta Y)$	360,8596	0,12245	2946,996	значимо	$\pm 0,7698$
		$\Theta = f(n)$	2,75886	0,06818	40,467	значимо	$\pm 0,5744$
		$\Theta = f(S)$	38,463	0,14154	271,744	значимо	$\pm 0,8277$
		$\Theta = f(A)$	2,853	0,03348	85,228	значимо	$\pm 0,4025$
	ВТ20	$\Theta = f(\Delta Y)$	876,1494	0,23058	3799,708	значимо	$\pm 1,0564$
		$\Theta = f(n)$	6,66921	0,09101	73,281	значимо	$\pm 0,6637$
		$\Theta = f(S)$	252,1385	0,07923	3182,562	значимо	$\pm 0,6192$
		$\Theta = f(A)$	14,3234	0,00368	3888,715	значимо	$\pm 0,1335$

BD-ZB P80	B95ПчТ2	$\Theta = f(\Delta Y)$	376,9139	0,08619	4372,974	значимо	$\pm 0,6459$
		$\Theta = f(n)$	1,72144	0,09087	18,9447	значимо	$\pm 0,6632$
		$\Theta = f(S)$	3,7807	0,01142	331,156	значимо	$\pm 0,2351$
		$\Theta = f(A)$	3,93412	0,00574	685,188	значимо	$\pm 0,1667$
	BT20	$\Theta = f(\Delta Y)$	890,8893	0,10699	8326,717	значимо	$\pm 0,7196$
		$\Theta = f(n)$	96,8061	0,03848	2515,533	значимо	$\pm 0,4316$
		$\Theta = f(S)$	111,9556	0,02634	4250,128	значимо	$\pm 0,3571$
		$\Theta = f(A)$	57,4664	0,06895	833,451	значимо	$\pm 0,5777$
BD-ZB P120	B95ПчТ2	$\Theta = f(\Delta Y)$	355,7941	0,38694	919,503	значимо	$\pm 1,3685$
		$\Theta = f(n)$	12,6634	0,04242	298,548	значимо	$\pm 0,4531$
		$\Theta = f(S)$	3,4645	0,03648	94,983	значимо	$\pm 0,4202$
		$\Theta = f(A)$	0,8211	0,01258	65,253	значимо	$\pm 0,2468$
	BT20	$\Theta = f(\Delta Y)$	1194,534	0,158	7560,343	значимо	$\pm 0,8745$
		$\Theta = f(n)$	421,027	0,05111	8237,935	значимо	$\pm 0,4974$
		$\Theta = f(S)$	153,273	0,01513	10133,75	значимо	$\pm 0,2706$
		$\Theta = f(A)$	0,8211	0,01258	65,253	значимо	$\pm 0,2468$

$$\begin{aligned} \Theta = & d_1 \cdot \Delta Y^2 + d_2 \cdot n^2 + d_3 \cdot S^2 + d_4 \cdot A^2 + d_5 \cdot \Delta Y + d_6 \cdot n + d_7 \cdot S + d_8 \cdot A + d_9 \cdot \\ & \cdot \Delta Y \cdot n + d_{10} \cdot \Delta Y \cdot S + d_{11} \cdot \Delta Y \cdot A + d_{12} \cdot n \cdot S + d_{13} \cdot n \cdot A + d_{14} \cdot S \cdot A + d_{15} \cdot \\ & \cdot \Delta Y \cdot n \cdot S + d_{16} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot A + d_{17} \cdot S \cdot n \cdot A + d_{18} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot S \cdot A + d_{19}. \end{aligned} \quad (5.59)$$

Зависимость температуры в зоне резания от параметров  $\Delta Y$ ,  $n$ ,  $S$  и  $A$  (5.59) получена по результатам экспериментов и после статистической обработки данных согласно п. 2.5.

Значения коэффициентов и свободного члена (5.59) приведены в таблице 5.17.

Таким образом, использование торцевых полимерно-абразивных щеток для скругления кромок обеспечивает все требования по размеру и шероховатости обработанных кромок. Полученные уравнения позволяют определить режимы обработки, при которых обеспечивается требуемая производительность процесса.

**Таблица 5.17 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (5.59)**

Коэффициент и свобод. член	Щетка BD-ZB Bristle™ P50		Щетка BD-ZB Bristle™ P80		Щетка BD-ZB Bristle™ P120	
	B95ПчТ2	BT20	B95ПчТ2	BT20	B95ПчТ2	BT20
$d_1$	1,15	2,2	1,15	2	1,15	2,5
$d_2$	$4 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6}$
$d_3$	$-6 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$
$d_4$	$-2 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	$-8 \cdot 10^{-4}$	$-3 \cdot 10^{-3}$	$-2,5 \cdot 10^{-4}$	$-3 \cdot 10^{-3}$
$d_5$	2	2,5	2	2,5	2	2,5
$d_6$	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$
$d_7$	0,05	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	0,05	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$
$d_8$	$-1 \cdot 10^{-6}$	$-1 \cdot 10^{-6}$	$-1 \cdot 10^{-6}$	$-1 \cdot 10^{-6}$	$-1 \cdot 10^{-6}$	$-1 \cdot 10^{-6}$
$d_9$	$3,169 \cdot 10^{-7}$	$3,169 \cdot 10^{-7}$	$3,169 \cdot 10^{-7}$	$3,169 \cdot 10^{-7}$	$3,169 \cdot 10^{-7}$	$3,169 \cdot 10^{-7}$
$d_{10}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$

$d_{11}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$
$d_{12}$	$5,333 \cdot 10^{-10}$	$5,333 \cdot 10^{-10}$	$5,333 \cdot 10^{-10}$	$5,333 \cdot 10^{-10}$	$5,333 \cdot 10^{-10}$	$5,333 \cdot 10^{-10}$
$d_{13}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$
$d_{14}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$
$d_{15}$	$1,829 \cdot 10^{-8}$	$1,829 \cdot 10^{-8}$	$1,829 \cdot 10^{-8}$	$1,829 \cdot 10^{-8}$	$1,829 \cdot 10^{-8}$	$1,829 \cdot 10^{-8}$
$d_{16}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$
$d_{17}$	$-6,577 \cdot 10^{-10}$	$-6,577 \cdot 10^{-10}$	$-6,577 \cdot 10^{-10}$	$-6,577 \cdot 10^{-10}$	$-6,577 \cdot 10^{-10}$	$-6,577 \cdot 10^{-10}$
$d_{18}$	$2,857 \cdot 10^{-11}$	$2,857 \cdot 10^{-11}$	$2,857 \cdot 10^{-11}$	$2,857 \cdot 10^{-11}$	$2,857 \cdot 10^{-11}$	$2,857 \cdot 10^{-11}$
$d_{19}$	12	16	15,65	7,65	15,65	9,65

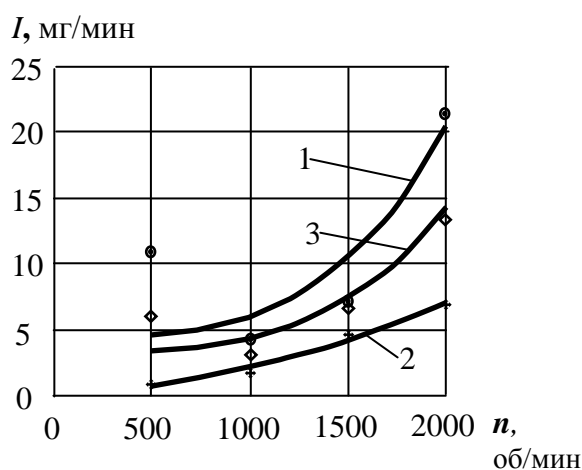
### 5.1.6 Износ ворсин торцевых щеток при обработке кромок

Информация об интенсивности износа щеток необходима при оптимизации процесса обработки кромок. Стоимость израсходованного инструмента учитывается при реализации программы оптимизации.

Износ торцевых щеток исследовался при обработке кромок по методике, изложенной в п. 4.5.

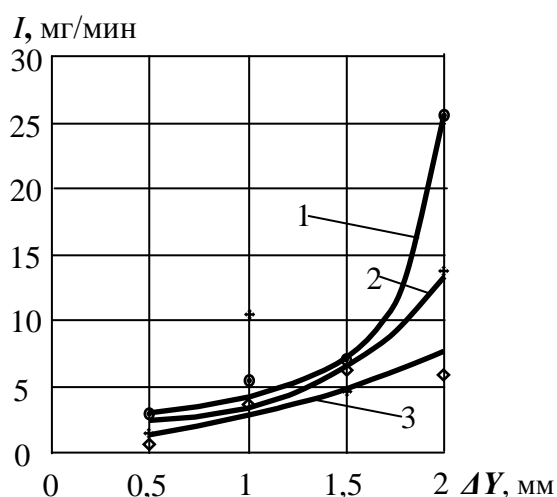
В результате экспериментальных исследований получены зависимости интенсивности износа ворсин торцевых щеток BD-ZB Bristle P50, BD-ZB Bristle P80, BD-ZB Bristle P120 (рисунок 5.19) от частоты вращения щетки  $n$ . Зависимости износа от деформации  $\Delta Y$  для тех же щеток приведены на рисунке 5.20.

Рост интенсивности износа объясняется увеличением сил резания, как при изменении частоты вращения, так и деформации щетки.



1 – BD-ZB Bristle P50; 2 – BD-ZB Bristle P80;  
3 – BD-ZB Bristle P120 при деформации  $\Delta Y = 1,5$  мм,  $A = 0$  мм.

**Рисунок 5.19 – Зависимость износа инструмента за 1 мин работы от частоты вращения  $n$  для торцевых щеток**



1 – BD-ZB Bristle P50; 2 – BD-ZB Bristle P80; 3 – BD-ZB Bristle P120 при частоте вращения  $n = 1500$  об/мин,  $A = 0$  мм.

**Рисунок 5.20 – Зависимость износа инструмента за 1 мин работы от деформации инструмента  $\Delta Y$  для торцевых щеток**

Заключение о значимости влияния рассматриваемого фактора  $\Delta Y$  и  $n$  на величину  $I$  получено с использованием критерия Фишера (см. п. 2.5.2).  $F_{0,95}$  – критерий Фишера при доверительной вероятности 0,95. Этот критерий при степенях свободы  $f_1 = k - 1 = 3$  и  $f_2 = k(n - 1) = 8$  по справочным данным [199] равен  $F_{0,95} = 4,1$ .

Доверительные границы определены как  $\pm S_0 \cdot t$ , где  $t$  – квантиль Стьюдента. При количестве степеней свободы 11:  $t = 2,20$  (таблица 5.18).

**Таблица 5.18 – Результаты дисперсионного анализа зависимостей величины  $I$  от частоты вращения  $n$  и деформации инструмента  $\Delta Y$**

Марка торцевой щетки	Функция	$S_A^2$ , (мг/мин) <sup>2</sup>	$S_0^2$ , (мг/мин) <sup>2</sup>	$F=S_A^2/S_0^2$	Значимость влияния фактора	Доверительные границы $S_0 \cdot t$ , мг/мин
BD-ZB P50	$I = f(\Delta Y)$	318,0342	0,13583	2341,356	значимо	$\pm 0,8108$
	$I = f(n)$	169,4097	0,125	1355,278	значимо	$\pm 0,7778$
BD-ZB P80	$I = f(\Delta Y)$	86,0897	0,105	819,902	значимо	$\pm 0,7129$
	$I = f(n)$	22,2564	0,105	211,966	значимо	$\pm 0,7129$
BD-ZB P120	$I = f(\Delta Y)$	18,5867	0,06583	282,329	значимо	$\pm 0,5645$
	$I = f(n)$	56,5208	0,14583	387,571	значимо	$\pm 0,8401$

Полученные экспериментальные зависимости в результате статистической обработки согласно п. 2.5, были аппроксимированы формулой вида:

$$I = a_1 \cdot n^2 + a_2 \cdot \Delta Y^2 + a_3 \cdot n + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot n \cdot \Delta Y + a_6, \quad (5.60)$$

где  $n$  – частота вращения, об/мин;  $\Delta Y$  – деформация щетки, мм.

Значения коэффициентов  $a_{1-5}$  и свободного члена  $a_6$  данных уравнений приведены в таблице 5.19.

При эксплуатации торцевых щеток, для оценки изношенности ее ворсин необходимо знать длину изношенной ее части. Поэтому приведенный по результатам экспериментального исследования износ в единицах массы необходимо перевести в длину изношенной части ворсины  $l_{\text{изн}}$ .

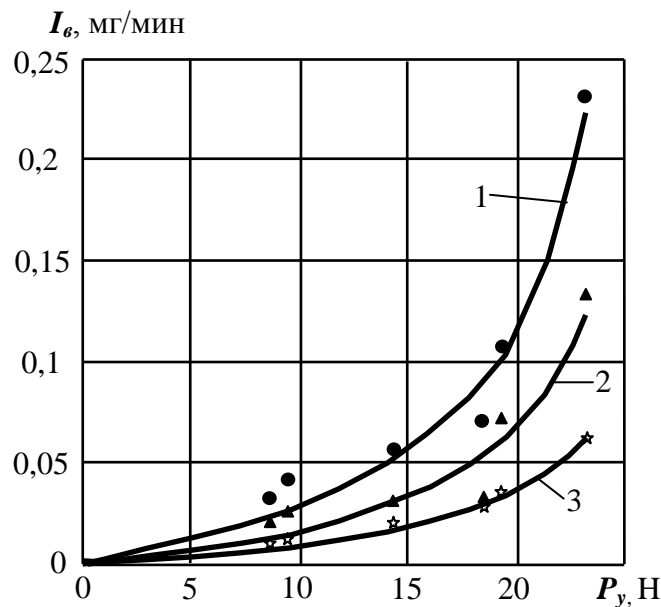
**Таблица 5.19 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (5.60)**

Коэффициент	Щетка торцевая BD-ZB Bristle P50	Щетка торцевая BD-ZB Bristle P80	Щетка торцевая BD-ZB Bristle P120
$a_1$	$2 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6}$
$a_2$	9,7333	5,5	0,7
$a_3$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$-5 \cdot 10^{-3}$
$a_4$	-9,5	-6,49	4,39
$a_5$	$8 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$
$a_6$	-7,74	-0,8	-5,7

При заданных размерах ворсины в сечениях AA и BB и рассчитанных площадей поперечных сечений  $F_{\text{BB}} = 1,7671 \text{ мм}^2$  и  $F_{\text{AA}} = 5,8371 \text{ мм}^2$  (см. рисунки 5.22 и 4.40), длина изношенной части ворсины ( $l_{\text{изн}}$ ) определится по формуле (4.35), аналогично радиальным щеткам.

Для удобства практического применения уравнения (4.35) для торцевых щеток предложена таблица В.21 (приложение В) с рассчитанными по (4.35) значениями  $l_{изн}$  в зависимости от состояния ворсин щетки по  $l_1$ . Кроме того, приведены графики, построенные по данной таблице (рисунок В.5 приложения В).

Для того, чтобы воспользоваться таблицей В.21 приложения В, а также графиками на рисунке В.5 приложения В, необходимо по уравнению (5.60) определить износ  $I$ , определить продолжительность работы щетки согласно разработанному технологическому процессу  $T$  и по



**Рисунок 5.21 – Зависимость износа единичной ворсины щеток  $I_v$  от силы резания  $P_y$  (на 1 ворсине) для щеток: 1 – BD-ZB P50; 2 – BD-ZB P80; 3 – BD-ZB P120**

Масса изношенной ворсины  $m_{изн}$  определится из уравнений (4.30), (4.32), (4.33), (4.34) и (4.36):  $m_{изн} = l_{изн} \cdot \gamma_v \cdot \left(\frac{F_1 + F_2}{2}\right) = \frac{\gamma_v \cdot K_{Дл}}{2} \cdot l_{изн} \cdot (2l_1 + l_{изн})$ .

Для исследованных щеток, время  $T_{изн}$  при заданных допустимых значениях  $l_{изн}$ , в качестве примера приведено в таблице В.22 приложения В для наименьшей  $I_{min}$  (мг/мин) и наибольшей  $I_{max}$  (мг/мин) возможной интенсивности износа.

На рисунке 5.21 приведены зависимости параметра износа  $I$  (5.60) в расчете на 1 ворсину ( $I_v$ ) от нормальной составляющей силы резания  $P_y$  (см. п. 5.1.2), возникающей на 1 ворсине при различных режимах обработки.

Полученные зависимости в результате статистической обработки (согласно п. 2.5) были аппроксимированы формулой вида:  $I_v = b_1 \cdot P_y^2 + b_2 \cdot P_y$ , (5.61)

где  $P_y$  – нормальная составляющая силы резания (см. п. 5.1.2) в расчете на 1 ворсину, Н.

Значения коэффициентов  $b_1, b_2$  уравнения (5.61) приведены в таблице 5.20.

формуле (4.31) рассчитать массу изношенной ворсины. При этом  $l_1$  фиксируется по фактическому состоянию изношенности щетки.

В связи с износом инструмента деформация щетки  $\Delta Y$  постепенно уменьшается, вследствие чего интенсивность съема материала падает. Поэтому при длительном процессе обработки необходимо периодически корректировать натяг инструмента на величину изношенной части  $l_{изн}$ , определяемой по формуле (4.35).

Время обработки, в течение которого наступает износ  $l_{изн}$  (в мин), определится из уравнения (4.31):

$$T_{изн} = \frac{m_{изн} \cdot N_v}{I}$$



**Таблица 5.20 – Значения коэффициентов в уравнении (5.61)**

<b>Коэффициент</b>	<b>Щетка торцевая BD-ZB Bristle P50</b>	<b>Щетка торцевая BD-ZB Bristle P80</b>	<b>Щетка торцевая BD-ZB Bristle P120</b>
$b_1$	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$
$b_2$	$-1,2 \cdot 10^{-3}$	$-7 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$

Таким образом, по известному значению нормальной составляющей силы резания можно прогнозировать износ инструмента. Зависимость (5.61) применима и для других случаев использования торцевых полимерно-абразивных щеток, например: обработка плоских, наружных цилиндрических поверхностей.

Разработанные эмпирические математические модели производительности процесса обработки, качества обработанных кромок, температуры в зоне обработки и износа инструмента при обработке острых кромок торцевыми полимерно-абразивными щетками, которые являются подсистемами четвертого уровня, следует считать устойчивыми в связи с тем, что воздействие возмущающих факторов (входных параметров) корректируется системой управления, рассмотренной в п. 2.1.2 и п. 7.1.

## **5.2 Обработка плоских поверхностей торцевыми полимерно-абразивными щетками**

### **5.2.1 Теоретические положения силового взаимодействия ворсин торцевых полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой плоскостью**

Одним из способов финишной обработки плоскостей с целью уменьшения шероховатости (например, под гальванические и лакокрасочные покрытия), является обработка торцевыми полимерно-абразивными щетками.

Для исследования сил резания в рамках настоящей работы использованы торцевые щетки Scotch-Brite™ BD-ZB Ø115 мм компании 3М с зернистостью P50, P80 и P120 (см. рисунок 2.12). Такие щетки состоят из 36-и рядов, в ряде – 15 ворсин, всего 540 ворсин (см. рисунок 5.1).

Составляющие силы резания  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  изменяются в зависимости от стадии обработки плоскости и количества ворсин, участвующих во взаимодействии с поверхностью.

В начале обработки силы создаются меньшим количеством действующих ворсин, а по мере продвижения щетки, их количество увеличивается. Все ворсины начинают участвовать во взаимодействии при полном касании щетки с обрабатываемой поверхностью. На этой стадии обработки возникают наибольшие силы, которые необходимы для определения, например, требуемой мощности оборудования.

Действующие силы возникают в результате упругой деформации, а также при ударе части ворсин о кромку детали при входе в процесс резания.

Для определения упругих составляющих сил на ворсине, необходимы знания механических свойств материала ворсин: модуль упругости первого рода и моменты инерции. Модуль

упругости исследован по методике, изложенной в п. 4.1.1, и приведен в таблице 5.21. Моменты инерции относительно осей  $X$  и  $Z$  необходимо определить.

Момент инерции  $J_X$  в сечении  $A - A$  (рисунок 5.22) рассчитывается следующим образом:

- для фигуры 1:  $J_{X1} = \frac{\pi \cdot r_1^4}{8} = 0,5749 \text{ мм}^4$ ;
- для фигуры 2:  $J_{X2} = \frac{(r_1+r_2)^3 \cdot b}{12} = 0,8706 \text{ мм}^4$ ;
- для фигуры 3:  $J_{X3} = \frac{\pi \cdot r_2^4}{8} = 0,1242 \text{ мм}^4$ .

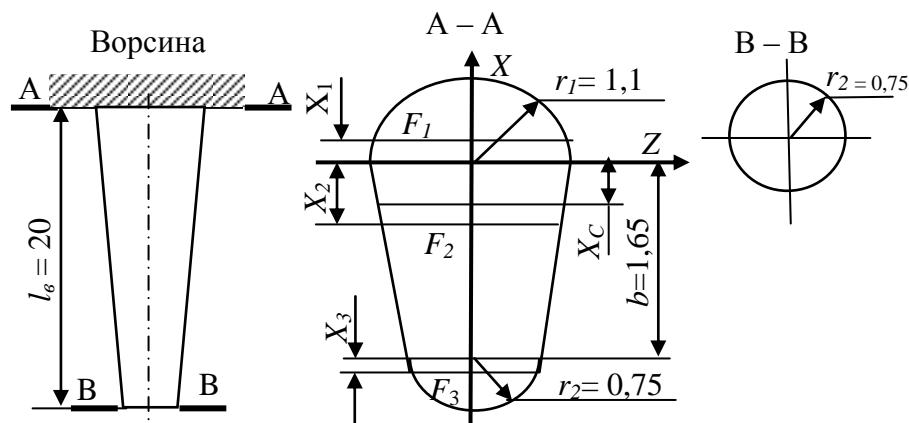
#### **Расчет момента инерции относительно оси $X$**

Суммарный момент инерции составит:  $J_{XAA} = J_{X1} + J_{X2} + J_{X3} = 1,5697 \text{ мм}^4$ .

Момент инерции  $J_X$  в сечении  $B - B$  определяется как:  $J_{XBB} = \frac{\pi \cdot r_2^4}{4} = 0,2485 \text{ мм}^4$ .

Средний момент инерции для всей ворсины находится по формуле:

$$J_{Xcp} = \frac{J_{XAA} + J_{XBB}}{2} = 0,9091 \text{ мм}^4.$$



**Рисунок 5.22 – Схема к расчету моментов инерции**

*Расчет момента инерции относительно оси  $Z$  (см. рисунок 5.22)*

Момент инерции  $J_Z$  в сечении  $A - A$  рассчитывается следующим образом:

- для фигуры 1:  $J_1 = 0,11 \cdot r_1^4 = 0,161 \text{ мм}^4$ ;
- для фигуры 2:  $J_2 = \frac{b^3(r_1^2 + r_1 \cdot r_2 + r_2^2)}{36(r_1 + r_2)} = 0,1752 \text{ мм}^4$ ;
- для фигуры 3:  $J_3 = 0,11 \cdot r_2^4 = 0,0348 \text{ мм}^4$ .

Положение центра тяжести и площадь находятся следующим образом:

- для фигуры 1 –  $X_1 = \frac{4r_1}{3\pi} = 0,467 \text{ мм}$ ;  $F_1 = \frac{\pi \cdot r_1^2}{2} = 1,901 \text{ мм}^2$ ;
- для фигуры 2 –  $X_2 = \frac{\frac{1}{3}(r_1 - r_2) \cdot b + r_2 \cdot b}{r_1 + r_2} = 0,773 \text{ мм}$ ;  $F_2 = b \cdot (r_1 + r_2) = 3,0525 \text{ мм}^2$ ;
- для фигуры 3 –  $X_3 = \frac{4r_2}{3\pi} = 0,318 \text{ мм}$ ;  $F_3 = \frac{\pi \cdot r_2^2}{2} = 0,8836 \text{ мм}^2$ .

$$X_C = \frac{F_1 X_1 + F_2 X_2 + F_3 (X_3 + b)}{2(F_2 + F_3)} = 0,4482 \text{ мм}.$$

Моменты инерции  $J_Z$  в сечении  $A - A$  относительно центра тяжести для фигуры:

$$J_{ZAA} = J_1 + F_1(X_1 + X_C)^2 + J_2 + F_2(X_2 - X_C)^2 + J_3 + F_3(X_{13} + b - X_C)^2 = 43262 \text{ мм}^4.$$

$$\text{Момент инерции } J_{ZBB} \text{ в сечении В – В: } J_{ZBB} = \frac{\pi \cdot r_2^4}{4} = 0,2485 \text{ мм}^4.$$

$$\text{Средний момент инерции для всей ворсины: } J_{Zcp} = \frac{J_{ZAA} + J_{ZBB}}{2} = 2,2873 \text{ мм}^4.$$

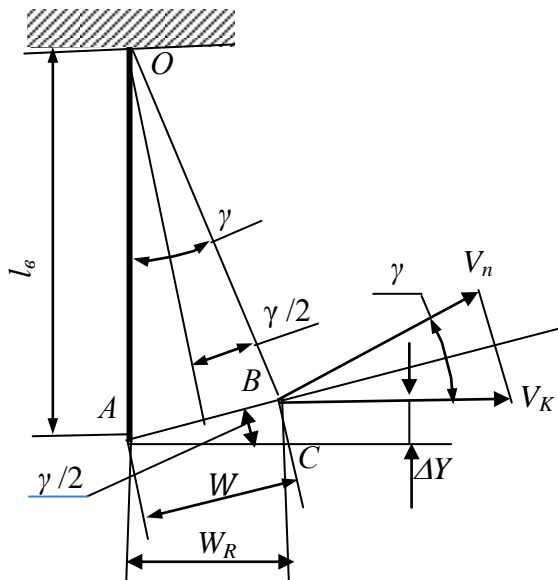
Результаты определения моментов инерции приведены в таблице 5.21

**Таблица 5.21 – Характеристики торцевых щёток компании 3М Ø115 мм**

Обозначение	Зернистость	Модуль упругости $E$ , Н/мм <sup>2</sup>	Момент инерции, мм <sup>4</sup>		Плотность $\gamma$ , г/мм <sup>3</sup>	Количество ворсин $N_\theta$	Длина ворсины $l_\theta$ , мм
			$J_{Xcp}$	$J_{Zcp}$			
BD-ZB	P50	412,68	0,9091	2,2873	2,52	540	20
	P80	452,8					
	P120	452,8					

$$\text{Упругая составляющая сил определяется по уравнению: } P_{уп} = \frac{3 \cdot W \cdot E \cdot J_{Xcp}}{l_B^3}, \quad (5.62)$$

где  $W$  – упругая деформация ворсины (рисунок 5.23);  $E$  – модуль упругости первого рода ворсины на изгиб (определялся по таблице 5.21).



**Рисунок 5.23 – Схема к расчету сил взаимодействия по 1-му ряду ворсин**

$$\gamma_1/2 \text{ (в радианах), получим: } \Delta Y = \frac{W_1^2}{2l_B}. \quad (5.65)$$

$$\text{Из уравнения (5.65): } W_1 = \sqrt{2 \cdot \Delta Y \cdot l_B}. \quad (5.66)$$

Деформация, перпендикулярная к радиусу, соединяющему ворсину с центром щетки, равна:  $W_R = W_1 \cdot \cos \frac{\gamma_1}{2}$ .

С учетом деформации ворсины под действием подачи  $S$ , полная ее деформация будет равна:  $W_P = \frac{W_R}{\cos \chi}$ , (5.67)

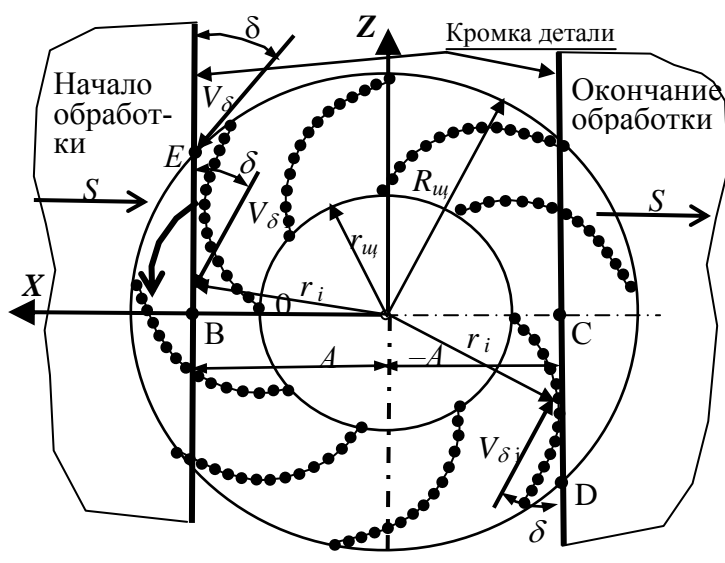
где  $\chi$  – угол между направлением подачи и скорости  $V_Z$ :  $\text{tg} \chi = \frac{S}{V_Z}$ .

В таблице 5.22 приведены результаты расчета деформаций ворсин с использованием формул (5.63–5.67) в зависимости от заданной деформации щетки  $\Delta Y$ .

**Таблица 5.22 – Деформация ворсин, участвующих в контакте с кромкой по 1-му ряду ворсин**

$\Delta Y$ , мм	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
$W$ , мм	4,472	6,324	7,795	8,944	10,95	12,65
$\gamma_l$ , град.	12,82	18,20	22,33	26,73	31,79	36,87
$W_{Rl}$ , мм	4,444	6,244	7,647	8,717	10,53	12,00

На обрабатываемую поверхность при входе в пределах от наружного диаметра щетки до



**Рисунок 5.24 – Схема к определению скоростей и угла при взаимодействии ворсин с кромкой детали**

ее оси, ворсинки действуют в одном направлении, а на другой половине щетки такие же ворсинки действуют в противоположном направлении. Поэтому составляющая силы  $P_z$  на таком же участке второй половины щетки будет численно равна силе на первой стороне, но иметь противоположное направление. Поэтому исследование сил целесообразно выполнить только для одной стороны щетки – в пределах от наружного диаметра щетки до ее оси.

Ворсинки воздействуют на кромку под углом  $\delta$  со скоростью  $V_\delta$  (рисунок 5.24). Поскольку обе величины являются переменными, в расчетах необходимо использовать средние значения.

Деформация ворсинки, от которой зависит упругая составляющая силы, корректируется в зависимости от угла  $\delta$ :  $W_Z = W_P \cdot \cos \delta_{cp}$ ;  $W_X = W_P \cdot \sin \delta_{cp}$ ,

где  $\delta_{cp}$  – средневзвешенный угол между осью  $Z$  и направлением деформации  $W_R$  (см. рисунок 5.24).

$$\text{При } A < r_{иц}: \delta_{cp} = \frac{F_B}{R_{иц}^2 - r_{иц}^2},$$

$$\text{где } F_B \text{ – площадь покрытая ворсинками: } F_B = \frac{R_{иц}^2}{4} (\alpha - \sin \alpha) - \frac{r_{иц}^2}{4} (\alpha_1 - \sin \alpha_1),$$

$$\text{где } \alpha = 2 \arccos \frac{A}{R_{иц}}; \quad \alpha_1 = 2 \arccos \frac{A}{r_{иц}}.$$

$$\text{При } A \geq r_{иц}: \delta_{cp} = \frac{S}{R_{иц}^2 - A^2},$$

$$\text{где } F_B = \frac{R_{иц}^2}{4} (\alpha - \sin \alpha) - \frac{1}{2} (\delta_{cp} \cdot R_{иц}^2 - A^2 \cdot \operatorname{tg} \delta_{cp}). \text{ Принято, что } \delta_{cp} \approx \operatorname{tg} \delta_{cp}.$$

Средний угол  $\delta_{cp}$  и количество ворсин  $N_B$  в зависимости от  $A$  при упругой деформации ворсин приведены в таблице 5.23.

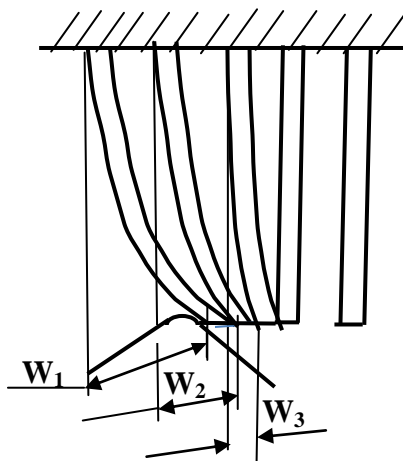
**Таблица 5.23 – Средние значения угла  $\delta_{cp}$  и количество ворсин**

$A$ , мм	0	22	30	38	46
$\delta_{cp}$ , град.	45	32,4	21,48	15,28	1,186
$N_B$ , шт	270	173,72	128,86	66,72	17,76

**Упругая составляющая силы  $P_{y,уп}$**

Сила по оси  $Y$ , в соответствии с уравнением (5.62), при  $l_g = W_{RC}$  определится по выражению:  $P_{y,уп} = 3E \cdot J_{Xcp} \cdot N_B \cdot K_Y \cdot \frac{W_Y}{W_P^3} = 3E \cdot J_{Xcp} \cdot N_B \cdot K_Y \cdot \frac{1}{2l_B \cdot W_P}$ , (5.68)

где  $W_Y$  – упругая деформация ворсины в вертикальном направлении (по оси  $Y$ ). В соответствии



**Рисунок 5.25 – Деформация рядов ворсин на щетке**

с уравнением (5.65):  $W_Y = \frac{W_{RP}^2}{2 \cdot l_B}$ ;

$N_B$  – количество ворсин, находящихся в контакте:

$$N_B = S_i \cdot N_1,$$

где  $S_i$  – площадь щетки, находящаяся в контакте;

$N_1$  – количество ворсин на единице площади:

$$N_1 = \frac{N_{B(общ)}}{S_{общ}} = \frac{540}{5215} \approx 0,1035 \frac{\text{шт}}{\text{мм}^2};$$

$N_{B(общ)}$  – общее количество ворсин на щетке;

$S_{общ}$  – общая площадь рабочей части щетки:

$$S_{общ} = \pi(R_{щ}^2 - r_{щ}^2) = 5215 \text{ мм}^2;$$

$K_{X,Y,Z}$  – экспериментально установленный коэффициент

взаимного влияния ворсин, скорости их перемещения по поверхности и деформации ворсин на процесс взаимодействия с обрабатываемой поверхностью:

$$K_{X,Y,Z} = (a_1 \cdot n^2 + a_2 \cdot n + a_3) \cdot (a_4 \cdot \Delta Y^2 + a_5 \cdot \Delta Y + a_6) \cdot (a_7 \cdot S^2 + a_8 \cdot S + a_9) \cdot (a_{10} \cdot A^3 + a_{11} \cdot A^2 + a_{12} \cdot A + a_{13}), \quad (5.69)$$

где  $n$  – частота вращения, об./мин;  $\Delta Y$  – деформация щетки, мм;  $S$  – подача в мм/мин;  $A$  – расстояние от оси щетки до кромки заготовки при входе в процесс обработки поверхности, мм (см. рисунок 5.24). Значения коэффициентов и свободных членов уравнения (5.69) приведены в таблице 5.24.

**Таблица 5.24 – Значения коэффициентов и свободных членов в уравнении (5.69)**

Коэфф. и своб. члены	Материал В95пчТ2		
	$K_X$	$K_Y$	$K_Z$
$a_1$	$1,633 \cdot 10^{-7}$	$-1,6455 \cdot 10^{-8}$	$-3,1818 \cdot 10^{-9}$
$a_2$	$-1,23 \cdot 10^{-4}$	$7,6282 \cdot 10^{-5}$	$8,8773 \cdot 10^{-5}$
$a_3$	0,2867	0,1052	0,0609
$a_4$	0,159	0,0938	0,1429
$a_5$	-0,3853	0,4221	-0,6406

$a_6$	1,2202	0,1558	1,6395
$a_7$	$-8,5644 \cdot 10^{-7}$	$2,5104 \cdot 10^{-7}$	$-3,65807 \cdot 10^{-6}$
$a_8$	$8,1907 \cdot 10^{-4}$	$7,3862 \cdot 10^{-5}$	$4,74426 \cdot 10^{-3}$
$a_9$	0,908	0,9862	0,44517
$a_{10}$	$1,96709 \cdot 10^{-4}$	$5,622 \cdot 10^{-5}$	$4,2133 \cdot 10^{-5}$
$a_{11}$	$-9,26987 \cdot 10^{-3}$	$-2,806 \cdot 10^{-3}$	$-2,138 \cdot 10^{-3}$
$a_{12}$	0,141118	0,036915	0,0155
$a_{13}$	1	1	1

### Упругая составляющая силы $P_{z,уп}$

Одновременно на кромку действуют  $N_B$  ворсин с деформацией  $W_Z$ .

Суммарная упругая составляющая силы, в соответствии с уравнением (5.62), определится как:  $P_{Z,уп} = \frac{3 \cdot E \cdot J_{X,ср}}{l_B^3} \cdot N_B \cdot K_Z \cdot W_Z = \frac{3 \cdot E \cdot J_{X,ср}}{l_B^3} \cdot N_B \cdot K_Z \cdot W_P \cdot \cos \delta_{ср}$ , (5.70)

### Упругая составляющая силы $P_x$

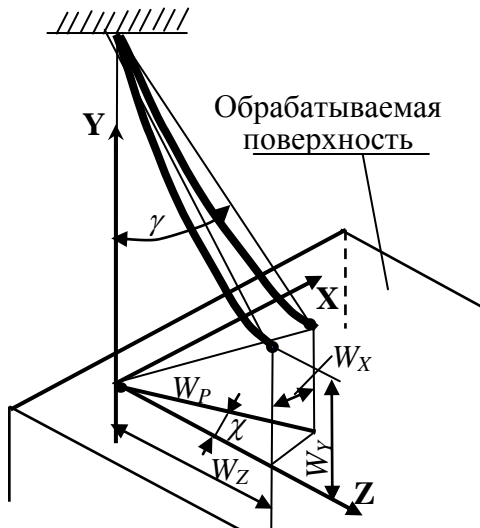


Рисунок 5.26 – Схема к расчету деформаций по осям X, Y и Z

Упругая составляющая силы  $P_{x,уп}$  определится

$$\text{как: } P_{X,уп} = \frac{3 \cdot E \cdot J_{Z,ср}}{l_B^3} \cdot W_X \cdot N_B \cdot K_X. \quad (5.71)$$

Ворсина в направлении оси X деформируется на величину  $W_X$  (рисунок 5.26):  $W_X = W_P \cdot \sin \delta_{ср}$ .

Количество действующих ворсин  $N_B$  дано в таблице 5.23.

**Ударная составляющая силы взаимодействия  $P_{y,уд}$**  возникает при входе в процесс обработки плоскости (удар о кромку) и определится через ударный импульс, который согласно [41] рассчитывается

$$\text{как: } J = m_B \cdot V = P_{уд} \cdot \tau, \quad (5.72)$$

где  $\tau$  – продолжительность удара;  $P_{y,уд}$  – сила удара;

$V$  – скорость удара.

$$\text{Сила удара из (5.72) равна: } P_{уд} = \frac{m_B \cdot V}{\tau}, \quad (5.73)$$

где  $m_B$  – масса ворсины, участвующая в ударе (на конце ворсины), определяется из соотношения (5.21).

Одновременно на плоскость действуют:  $N_{B1}$  ворсин 1-го ряда (см. рисунок 5.4),  $N_{B1}$  ворсин 2-го ряда, расположенных в шахматном порядке относительно 1-го ряда. Действие 3-го и последующих рядов в расчетах не учитывается ввиду того, что непосредственно на кромку они не действуют, а воздействовать могут только через предыдущие ряды.

Количество ворсин, находящихся в контакте с кромкой, определяется по эмпирической формуле (5.8).

Время удара в уравнении (5.73) в соответствии с теорией Г. Герца и [159] определяется для всех составляющих силы –  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  – по формуле:  $\tau = 3,213 \left(\frac{m_B^2}{V}\right)^{1/5} = 3,213 \left(\frac{m_B}{\sqrt{V}}\right)^{2/5}$ , (5.74)

**Ударная составляющая силы  $P_{z,уд}$ .**

Суммарная ударная составляющая силы определится как:  $P_{z,уд} = 2m_B \cdot N_{B1} \cdot \frac{V_z}{\tau_z}$ . (5.75)

При  $A < r_{щ}$  средняя скорость  $V_z$  равна:  $V_z = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + r_{щ}) \cdot \cos \delta_{cp}$ .

$$\delta_{cp,1} = \frac{1}{2} \left( \arccos \frac{A}{R_{щ}} + \arccos \frac{A}{r_{щ}} \right),$$

где  $A$  – смещение кромки детали относительно оси щетки.

При  $A \geq r_{щ}$  средняя скорость  $V_z$  равна:  $V_z = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + A) \cdot \cos \delta_{cp}$ .  $\delta_{cp,1} = \frac{1}{2} \arccos \frac{A}{R_{щ}}$ .

Средний угол  $\delta_{cp1}$  и количество ворсин  $N_{B1}$  в зависимости от  $A$  при ударном воздействии ворсин приведены в таблице 5.25.

**Таблица 5.25 – Средние значения угла  $\delta_{cp}$  и количество ворсин**

Параметр	Значение				
$A$ , мм	0	22	30	38	46
$\delta_{cp,1}$ град.	90	55,2	36,06	21,22	13,36
$N_{B1}$ , шт.	5	8,17	9,88	8,14	4,83

Для расчета времени удара по уравнению (5.74), скорость  $V_z$  ср принимаем средней по выражению:

- при  $A < r_{щ}$  средняя скорость равна:

$$V_{z,ср} = 0,5 \left[ \left( \frac{\pi \cdot n \cdot \cos \delta_{cp}}{30} \right)^{-0,2} (r_{щ}^{-0,2} + R_{щ}^{-0,2}) \right];$$

- при  $A \geq r_{щ}$  средняя скорость равна:  $V_{z,ср} = 0,5 \left[ \left( \frac{\pi \cdot n \cdot \cos \delta_{cp}}{30} \right)^{-0,2} (A^{-0,2} + R_{щ}^{-0,2}) \right]$ .

В этом случае уравнение (5.74) будет иметь вид:  $\tau_z = 3,213 \cdot V_{z,ср} (m_B)^{2/5}$ . (5.76)

В целом сила  $P_z$  будет равна:  $P_z = P_{z,yn} + P_{z,уд}$ .

**Ударная составляющая силы  $P_{x,уд}$**

Определится из выражения:  $P_{x,уд} = 2m_B \cdot N_{B1} \cdot \frac{V_x}{\tau_x}$ , (5.77)

При  $A_i < r_{щ}$  средняя скорость равна:  $V_x = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + r_{щ}) \cdot \sin \delta_{cp}$ .

При  $A_i \geq r_{щ}$  средняя скорость равна:  $V_x = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + A) \cdot \sin \delta_{cp}$ .

Для расчета времени удара по уравнению (5.74), скорость  $V_x$  принимаем средней по следующим выражениям:

- при  $A_i < r_{щ}$  средняя скорость равна:

$$V_{Xcp} = 0,5 \left[ \left( \frac{\pi \cdot n \cdot \sin \delta_{cp}}{30} \right)^{-0,2} (r_{щ}^{-0,2} + R_{щ}^{-0,2}) \right];$$

- при  $A_i \geq r_{щ}$  средняя скорость равна:  $V_{Xcp} = 0,5 \left[ \left( \frac{\pi \cdot n \cdot \sin \delta_{cp}}{30} \right)^{-0,2} (A^{-0,2} + R_{щ}^{-0,2}) \right]$ ,

В этом случае уравнение (5.74) будет иметь вид:  $\tau_x = 3,213 \cdot V_{Xcp} (m_B)^{2/5}$ .

В целом сила  $P_x$  будет равна:  $P_x = P_{xyn} + P_{xyд}$ .

#### **Ударная составляющая силы $P_{y,уд}$**

Определится из выражения:  $P_{y,уд} = 2m_B \cdot N_{B1} \cdot \frac{V_Y}{\tau_y}$ , (5.78)

где  $V_Y$  – вертикальная составляющая скорости движения ворсины.

При  $A_i < r_{щ}$ :  $V_Y = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + r_{щ}) / tg \gamma_1$ ; при  $A_i \geq r_{щ}$ :  $V_Y = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + A) / tg \gamma_1$ ,

где  $\gamma_1$  – угол поворота ворсины на ее вершине при воздействии сил  $P_z$  и  $P_x$ ;

Для расчета времени удара по уравнению (5.74) скорость  $V_{zcp}$  принимаем средней. Тогда:

- при  $A_i < r_{щ}$  средняя скорость равна:

$$V_{Ycp} = 0,5 \left[ \left( \frac{\pi \cdot n}{30 \cdot tg \gamma_1} \right)^{-0,2} (r_{щ}^{-0,2} + R_{щ}^{-0,2}) \right];$$

- при  $A_i \geq r_{щ}$  средняя скорость равна:

$$V_{Ycp} = 0,5 \left[ \left( \frac{\pi \cdot n}{30 \cdot tg \gamma_1} \right)^{-0,2} (A^{-0,2} + R_{щ}^{-0,2}) \right].$$

В этом случае уравнение (5.74) будет иметь вид:  $\tau_Y = 3,213 \cdot V_{Ycp} (m_B)^{2/5}$ .

В целом сила  $P_y$  будет равна:  $P_y = P_{yyn} + P_{y,уд}$ .

#### **Экспериментальное исследование сил $P_x$ , $P_y$ и $P_z$**

Для подтверждения адекватности разработанных теоретических математических моделей, проведены эксперименты при использовании трех торцевых щеток BD-ZB Ø115 мм компании ЗМ [270] с зернистостью P50, P80 и P120 (см. рисунок 2.12).

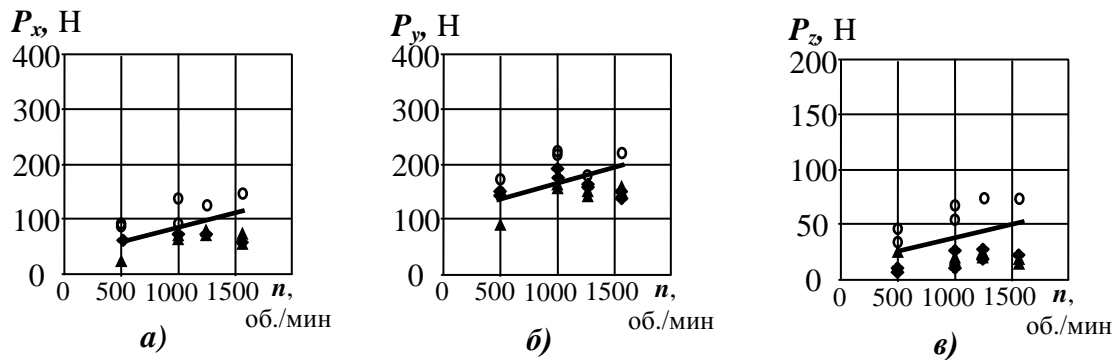
Исследования всех составляющих силы резания проведены при обработке плоскостей на образцах из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2 (см. рисунок 2.13), которые крепились в приспособлении и обрабатывались на универсально-фрезерном станке марки Deckel Maho DMC 635V (см. рисунок 2.17). Измерения сил проводились на трехкомпонентном динамометре фирмы Kistler (Швейцария), модель 9253B23 (см. рисунок 2.25) согласно рекомендациям [244, 328].

При этом четкого влияния зернистости щеток на силы не выявлено, что подтверждено результатами дисперсионного анализа экспериментальных данных (методика описана в п. 2.5.2). Поэтому принято решение результаты исследования оценивать средними арифметическими по трем щеткам.

На рисунке 5.27 приведены зависимости составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  от ча-

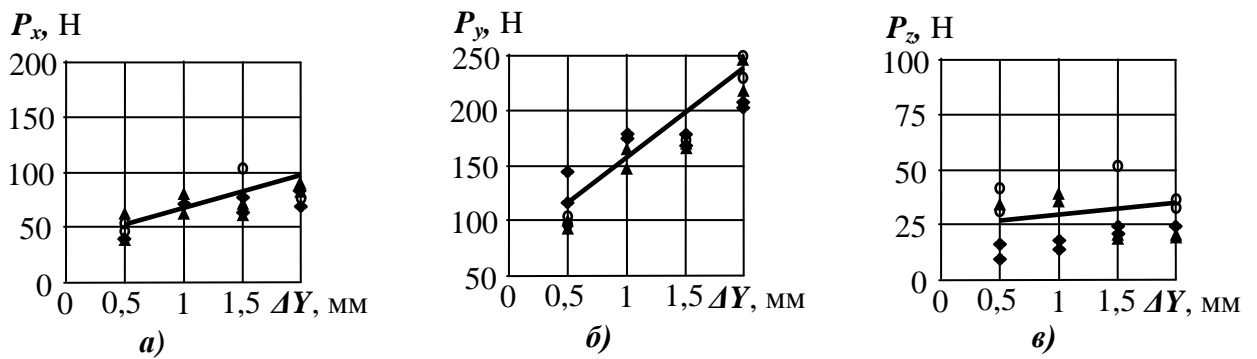


стоты вращения щетки. С увеличением частоты вращения все составляющие силы растут, что объясняется ростом ударной составляющей в соответствии с уравнениями (5.75), (5.77), (5.78).

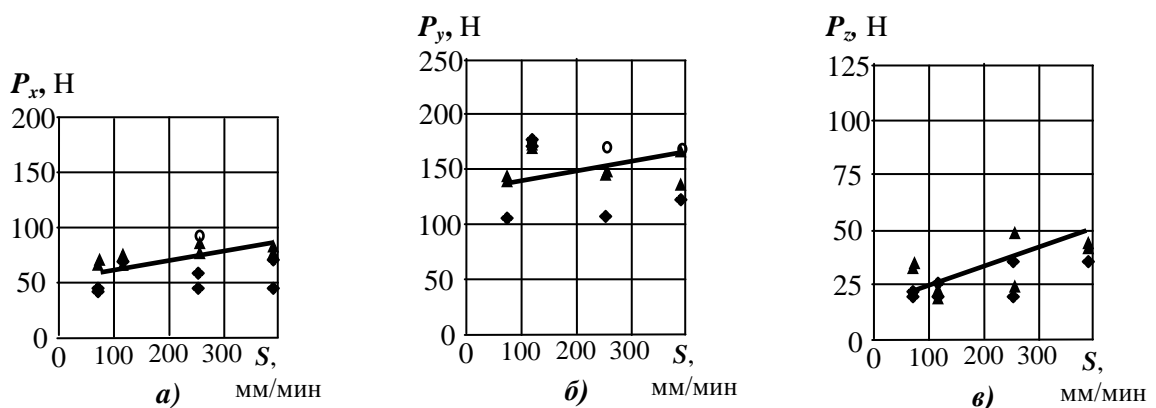


**Рисунок 5.27 – Зависимости силы  $P_x$  (а),  $P_y$  (б),  $P_z$  (в), от частоты вращения  $n$  для торцевых щеток: BD-ZB P50, BD-ZB P80, BD-ZB P120 при  $A=0$  мм,  $\Delta Y=1,5$  мм,  $S=130$  мм/мин**

Величина деформации щетки влияет на упругую составляющую силы. Это видно на рисунке 5.28. Упругая составляющая растет согласно уравнениям (5.68), (5.70) и (5.71).



**Рисунок 5.28 – Зависимости сил  $P_x$  (а),  $P_y$  (б),  $P_z$  (в), от деформации  $\Delta Y$  для торцевых щеток: BD-ZB P50, BD-ZB P80, BD-ZB P120 при  $A = 0$  мм,  $n=1000$  об./мин,  $S=130$  мм/мин**

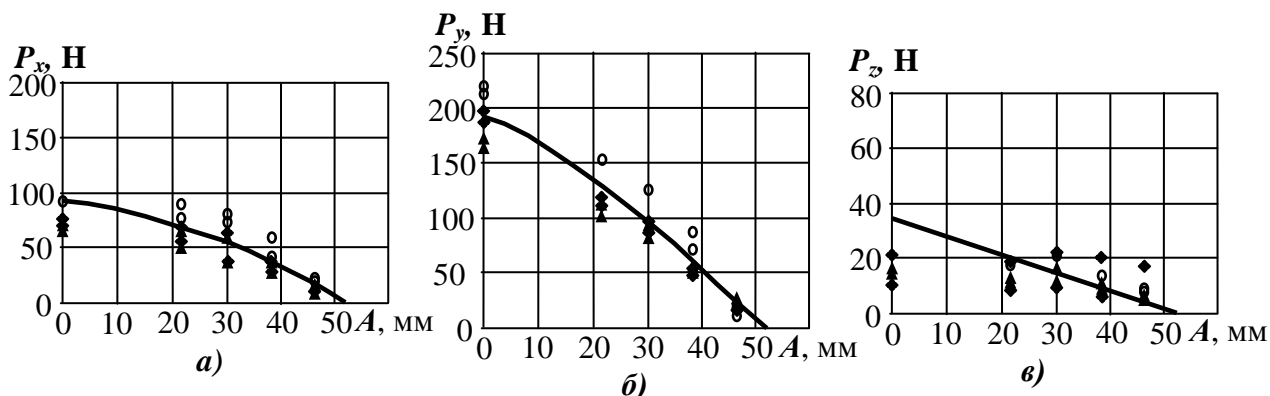


**Рисунок 5.29 – Зависимости силы  $P_x$  (а),  $P_y$  (б),  $P_z$  (в), от подачи  $S$  для торцевых щеток: BD-ZB Scotch-Brite™ Bristle P50, BD-ZB Scotch-Brite™ Bristle P80, BD-ZB Scotch-Brite™ Bristle P120 при  $A=0$  мм,  $n=1000$  об./мин,  $\Delta Y=1,5$  мм**

По исследованным зависимостям сил от подачи можно констатировать, что с увеличением подачи (рисунок 5.29), составляющие силы резания возрастают. Это подтверждено как тео-

реческими расчетами, так и результатами статистической обработки экспериментальных данных.

При входе в процесс обработки плоскости заготовки размер  $A$  (см. рисунок 5.24) изменяется от 51,5 (на периферии щетки) до 0. При этом изменяется и количество ворсин, участвующих во взаимодействии с поверхностью заготовки (от  $N_B = 0$  при  $A = 51,5$  мм до  $N_B = 270$  при  $A = 0$ ). Соответственно, изменяются и все составляющие силы резания, что видно на рисунке 5.30.



**Рисунок 5.30 – Зависимости силы  $P_x$  (а),  $P_y$  (б),  $P_z$  (в), от смещения относительно центра  $A$  для торцевых щеток: BD-ZB P50, BD-ZB P80, BD-ZB P120 при  $n=1000$  об/мин,  $\Delta Y=1,5$  мм,  $S=130$  мм/мин**

При дальнейшем входе в процесс обработки плоскости заготовки (зона С – 0 на рисунке 5.24), все составляющие силы увеличиваются:

$$P_x = 2P_{x0уп} - P_{x(A)уп} + P_{x(A)уд}; \quad P_y = 2P_{y0уп} - P_{y(A)уп} + P_{y(A)уд}; \quad P_z = 2P_{z0уп} - P_{z(A)уп} + P_{z(A)уд}.$$

Если задействована вся рабочая поверхность щетки, составляющие силы будут равны:

$$P_x = 2P_{x0уп}; \quad P_y = 2P_{y0уп}; \quad P_z = 2P_{z0уп}.$$

Необходимо отметить, что на рисунках 5.27–5.30 экспериментальные данные по щеткам трех зернистостей, проставлены точками, а теоретически рассчитанные – сплошными линиями.

Результаты расчета сил  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$ , а также теоретически рассчитанные упругие и ударные составляющие  $P_{yn}$  и  $P_{y\partial}$ , представлены в таблицах В.23 – В.26 приложения В. В эти же таблицы включены экспериментальные данные, полученные как средние по щеткам BD-ZB P50, BD-ZB P80 и BD-ZB P120.

В целом можно констатировать, что силы, рассчитанные теоретически, хорошо коррелируют с экспериментальными данными. Доверительные границы отклонений статистически обработанных экспериментальных от теоретически полученных данных при доверительной вероятности  $P=0,95$  определены в соответствии с методикой, описанной в п. 2.5 и приведены в таблице 5.26.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанные теоретические положения силового взаимодействия ворсин торцевых полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой

мой плоской поверхностью, адекватно отображает процессы, происходящие в реальных условиях обработки.

**Таблица 5.26 – Доверительные границы отклонений теоретически рассчитанных сил резания и статистически обработанных экспериментальных данных**

Составляющая силы	Доверительные границы, Н
$P_x$	$\pm 4,12$
$P_y$	$\pm 6,34$
$P_z$	$\pm 5,93$

В производственных условиях, разработанные математические модели могут быть использованы при наличии соответствующего программного обеспечения, при его отсутствии возможно использование упрощенных зависимостей, полученных путем аппроксимации данных, рассчитанных теоретически. Данные зависимости (В.2) справедливы для исследованных в настоящей работе торцевых полимерно-абразивных щеток при обработке поверхностей деталей из сплава В95пчТ2 и приведены в приложении В (см. п. В.8).

Разработанную математическую модель силового взаимодействия ворсин торцевых полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой плоскостью, которая является подсистемой третьего уровня, следует считать устойчивой в связи с тем, что воздействие возмущающих факторов (входных параметров) корректируется системой управления, рассмотренной в п. 2.1.2.

### **5.2.2 Производительность и качество обработки плоскостей торцевыми полимерно-абразивными щетками**

Исследование производительности процесса обработки плоскостей торцевыми полимерно-абразивными щетками и качества обработанной поверхности позволит при проектировании технологического процесса обоснованно выбрать режимы обработки для выполнения данной финишной операции.

Для исследования использовались торцевые щетки Scotch-Brite™: BD-ZB Bristle P50; BD-ZB Bristle P80; BD-ZB Bristle P120 Ø115 мм компании 3М [270] с зернистостью P50, P80 и P120 (см. рисунок 2.12). Щетка содержит 540 ворсин, расположенных в 36-и рядах, в каждом ряду по 15 ворсин, длина ворсины 20 мм.

#### ***Экспериментальные исследования производительности процесса обработки***

Экспериментальные исследования проводились на универсально-фрезерном станке (см. рисунок 2.17). Обработка производилась на следующих режимах:

- частота вращения щетки  $n = 500, 1000, 1250, 1600$  об/мин,
- подача (попутная)  $S = 82, 130, 255, 395$  мм/мин,
- радиальная деформация щетки  $\Delta Y = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$  мм.

На указанных режимах были проведены эксперименты по обработке образцов из алюминиевого сплава В95пчТ2 длиной  $l = 100$ мм, и шириной  $B = 20$ мм (см. рисунок 2.13).

В качестве показателя производительности процесса использован относительный сьем  $Q$  (в мкм/мин), который рассчитывался по формуле:  $Q = \frac{g_1 - g_2}{\gamma_{al} \cdot B \cdot l \cdot T}$ ,

где  $\gamma_{al} = 2,85 \cdot 10^{-3}$  г/мм<sup>3</sup> – плотность для материала В95пчТ2;  $T$  – время обработки в мин  $T = l/S$ ;  $g_1$  и  $g_2$  – масса образца до и после обработки соответственно, г.

Измерение масс производилось на электронных весах (см. рисунок 2.21). Зависимости по экспериментальным данным на графиках строились согласно методике, изложенной в п. 2.5.

Установлено, что относительный сьем с увеличением деформации растет, что можно видеть на рисунке 5.31. Это объясняется тем, что с увеличением деформации растет вертикальная составляющая силы, а, следовательно, и увеличивается глубина внедрения единичных зерен в обрабатываемый материал. С увеличением зернистости щетки сьем материала возрастает. Это объясняется тем, что количество зерен, находящихся в контакте с поверхностью, зависит от зернистости. Чем крупнее зерно, тем количество зерен меньше, а, следовательно, они внедряются в материал глубже и сьем материала идет интенсивнее.

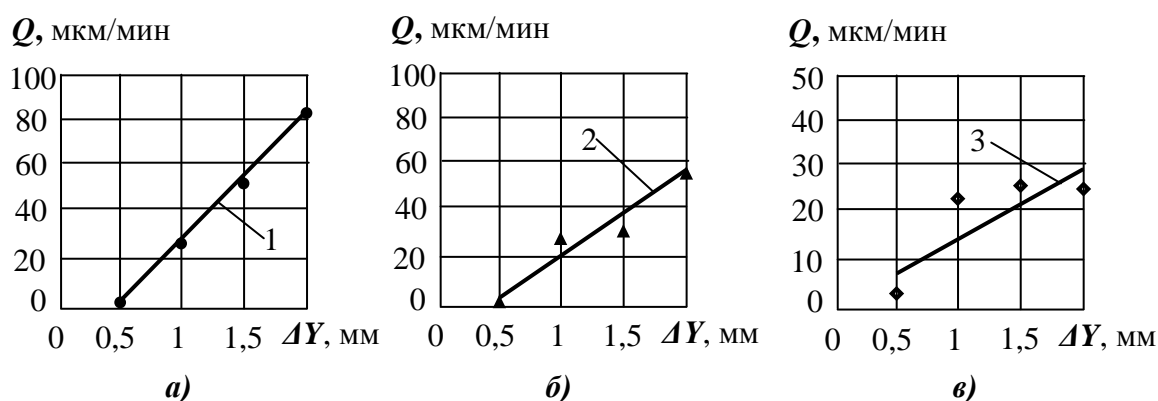


Рисунок 5.31– Зависимость относительного съема материала  $Q$  от деформации  $\Delta Y$  при  $n=1000$  об/мин,  $S = 130$  мм/мин для торцевых щеток: а – BD-ZB P50; б – BD-ZB P80; в – BD-ZB P120

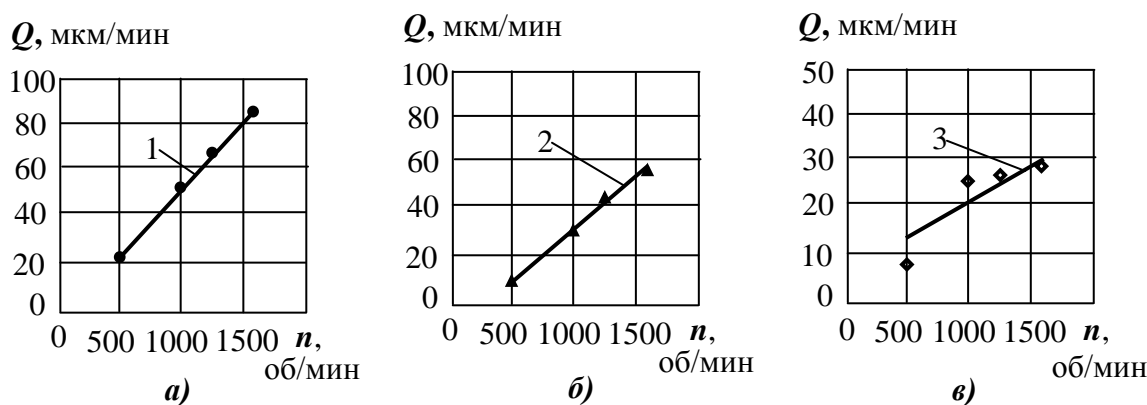
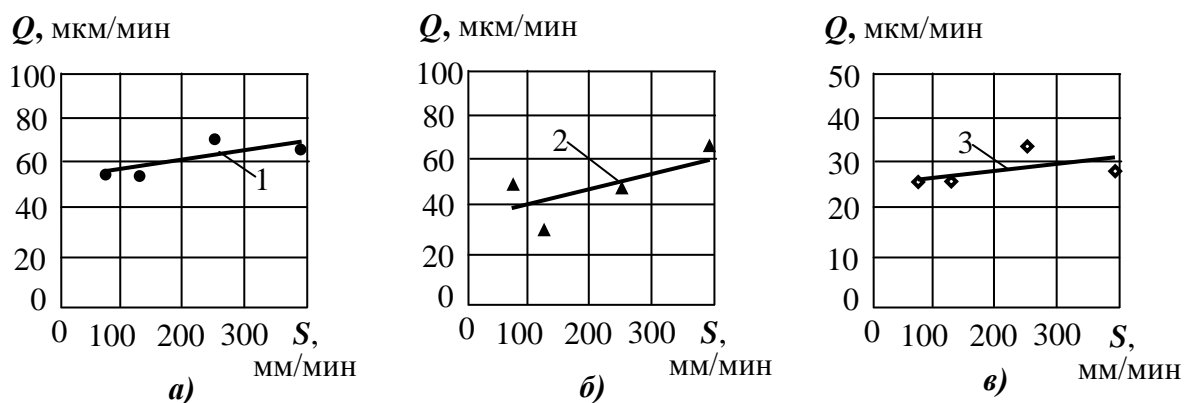


Рисунок 5.32 – Зависимость относительного съема материала  $Q$  от частоты вращения  $n$  при  $\Delta Y=1,5$  мм,  $S = 130$  мм/мин для торцевых щеток: а – BD-ZB P50; б – BD-ZB P80; в – BD-ZB P120

На рисунке 5.32 приведены зависимости относительного съема от частоты вращения щетки. Установлено, что относительный съем материала с увеличением частоты вращения растет. Это объясняется тем, что с увеличением частоты вращения растет динамическая составляющая силы удара ворсин по обрабатываемой поверхности.

С увеличением подачи относительный съем материала увеличивается (рисунок 5.33), что также связано с ростом сил резания.



**Рисунок 5.33 – Зависимость относительного съема материала  $Q$  от подачи  $S$  при  $\Delta Y=1,5$  мм,  $n = 1000$  об/мин для торцевых щеток: а – BD-ZB P50; б – BD-ZB P80; в – BD-ZB P120**

Заключение о значимости влияния рассматриваемого фактора  $\Delta Y$ ,  $n$  и  $S$  на величину  $Q$  получено с использованием критерия Фишера (см. п. 2.5.2).  $F_{0,95}$  – критерий Фишера при доверительной вероятности 0,95. Этот критерий при степенях свободы  $f_1 = k - 1 = 3$  и  $f_2 = k(n - 1) = 8$  по справочным данным [199] равен  $F_{0,95} = 4,1$ .

Доверительные границы определены как  $\pm S_0 \cdot t$ , где  $t$  – квантиль Стьюдента. При количестве степеней свободы 11:  $t = 2,20$  (таблица 5.27).

**Таблица 5.27 – Результаты дисперсионного анализа зависимостей величины  $Q$  от частоты вращения  $n$ , деформации инструмента  $\Delta Y$  и подачи  $S$**

Марка торцевой щетки	Функция	$S_A^2$ , (мкм/мин) <sup>2</sup>	$S_0^2$ , (мкм/мин) <sup>2</sup>	$F=S_A^2/S_0^2$	Значимость влияния фактора	Доверительные границы $S_0 \cdot t$ , мкм/мин
BD-ZB P50	$Q = f(\Delta Y)$	3761,139	1,75	2149,222	значимо	$\pm 2,9103$
	$Q = f(n)$	2045,639	0,5	4091,278	значимо	$\pm 1,5556$
	$Q = f(S)$	86,0833	0,58333	147,571	значимо	$\pm 1,6803$
BD-ZB P80	$Q = f(\Delta Y)$	1372,472	0,1875	7319,852	значимо	$\pm 0,9526$
	$Q = f(n)$	1474,083	0,5	2948,167	значимо	$\pm 1,5556$
	$Q = f(S)$	545,111	2,41667	225,563	значимо	$\pm 3,42$
BD-ZB P120	$Q = f(\Delta Y)$	299,464	0,06583	4548,827	значимо	$\pm 0,5645$
	$Q = f(n)$	252,75	0,33333	758,25	значимо	$\pm 1,2701$
	$Q = f(S)$	29,6667	0,5	59,333	значимо	$\pm 1,5556$

По полученным экспериментальным зависимостям съема материала от деформации щетки  $\Delta Y$  (мм), частоты ее вращения  $n$  (об/мин) и подачи  $S$  (мм/мин) проведен регрессионный анализ (см. п. 2.5) и получены уравнения:

$$Q = a_1 \cdot \Delta Y^2 + a_2 \cdot n^2 + a_3 \cdot S^2 + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot n + a_6 \cdot S + a_7 \cdot \Delta Y \cdot n + a_8 \cdot \Delta Y \cdot S + a_9 \cdot n \cdot S + a_{10} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot S + a_{11}. \quad (5.79)$$

Значения коэффициентов  $a_{1-10}$ , и свободного члена  $a_{11}$  в данном уравнении приведены в таблице 5.28.

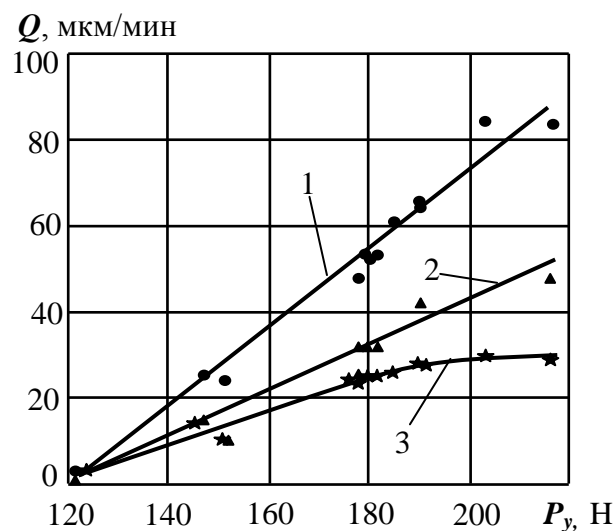
Отмеченное выше влияние сил резания на производительность процесса наглядно представлено в таблице 5.29, в которой значения съема материала  $Q$  получены по уравнению (5.79).

Данные о силах резания приведены в п. 5.2.1 для случая обработки образцов из материала В95пчТ2 всей шириной щетки. Различие в ширине образцов при исследованиях производительности процесса и сил резания не препятствует установлению влияния сил резания на интенсивность съема материала в зависимости от режимных параметров обработки.

С увеличением всех составляющих силы резания ( $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$ ) съем материала увеличивается на щетках всех зернистостей. Это хорошо видно на зависимостях съема материала от нормальной составляющей силы  $P_y$  (рисунок 5.34), построенных по всем данным, рассчитанным по уравнению (5.79).

**Таблица 5.28 – Значения коэффициентов и свободного члена в (5.79)**

Коэф- фициент	Щетка		
	BD-ZB P50	BD-ZB P80	BD-ZB P120
$a_1$	7,243	3,524	-10,688
$a_2$	$-7 \cdot 10^{-6}$	$-7 \cdot 10^{-8}$	$-2 \cdot 10^{-5}$
$a_3$	$-6 \cdot 10^{-5}$	$-1 \cdot 10^{-5}$	$-3 \cdot 10^{-5}$
$a_4$	35,669	22,887	44,576
$a_5$	0,0701	0,042	0,0611
$a_6$	0,0826	0,1412	0,0329
$a_7$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$
$a_8$	$-2 \cdot 10^{-9}$	$-2 \cdot 10^{-9}$	$-2 \cdot 10^{-9}$
$a_9$	$5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$
$a_{10}$	$2 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-11}$
$a_{11}$	-89,55	-71,45	-62,45



**Рисунок 5.34 – Зависимость съема материала от силы резания для щеток:**  
1 – BD-ZB P50; 2 – BD-ZB P80;  
3 – BD-ZB P120

Таблица 5.29 – Влияние силы резания на производительность процесса обработки плоскостей торцевыми щетками BD-ZB различной зернистости

Режимы обработки			$P_x$ , Н	$P_y$ , Н	$P_z$ , Н	Съем материала щетками $Q$ , мкм/мин		
$n$ , об/мин	$\Delta Y$ , мм	$S$ , мм/мин				BD-ZB P50	BD-ZB P80	BD-ZB P120
500	1,5	130	65,12	151,76	23,53	23,27	9,98	9,69
1000			80,02	180,01	33,00	53,07	30,93	25,24
1250			94,98	190,76	37,61	66,66	41,39	29,26
1600			124,30	202,03	43,91	84,21	56,02	30,70
1000	0,5	130	49,52	121,01	25,93	2,92	0,99	2,04
	1		63,52	148,01	30,73	26,19	15,08	16,31
	1,5		80,02	180,01	33,13	53,07	30,93	25,24
	2		99,02	217,01	34,94	83,58	48,54	28,82
1000	1,5	82	77,56	178,19	26,69	49,72	24,25	23,96
		130	80,02	180,01	33,00	53,07	30,93	25,24
		255	84,93	184,74	46,85	60,51	48,09	27,90
		395	87,83	190,05	57,91	66,62	66,95	29,78

### Шероховатость обработанной поверхности

Исследовано влияние деформации щетки, частоты ее вращения, подачи и зернистости на продольную и поперечную шероховатость обработанной поверхности по параметру  $Ra$ . Измерения шероховатости производились на профилометре, показанном рисунке 2.23.

Установлено (рисунок 5.35), что поперечная шероховатость с увеличением деформации щетки растет. Это объясняется тем, что с увеличением деформации растет нормальная к поверхности составляющая силы резания, а, следовательно, и увеличивается глубина внедрения единичных зерен в обрабатываемый материал.

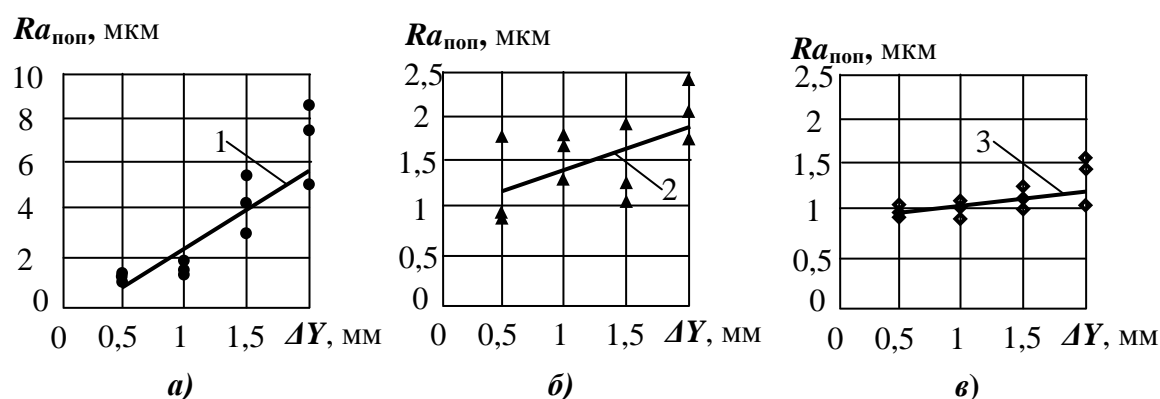
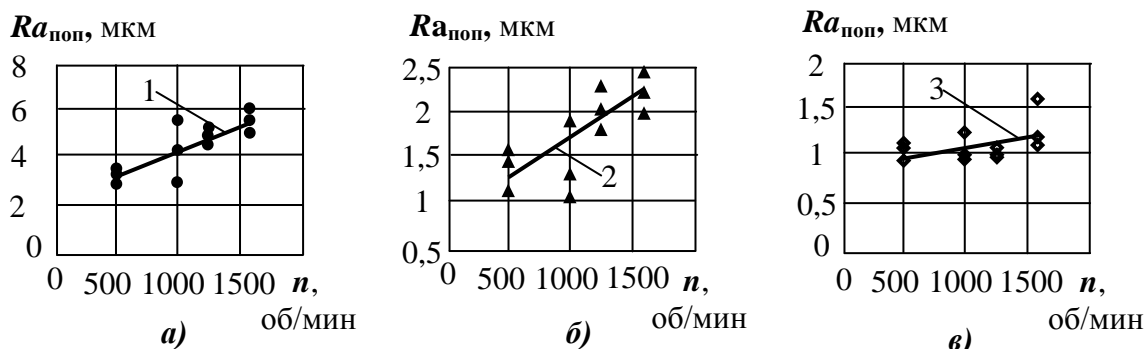


Рисунок 5.35 – Зависимость поперечной шероховатости  $Ra$  от деформации  $\Delta Y$  при  $n=1000$  об/мин,  $S = 130$  мм/мин для торцевых щеток: *a* – BD-ZB P50; *б* – BD-ZB P80; *в* – BD-ZB P120

С увеличением частоты вращения щетки (рисунок 5.36), поперечная шероховатость растет. Это объясняется тем, что с увеличением скорости растет ударная составляющая силы резания.



**Рисунок 5.36– Зависимость поперечной шероховатости  $Ra$  от частоты вращения  $n$  при  $\Delta Y=1,5$  мм,  $S = 130$  мм/мин для торцевых щеток: а – BD-ZB P50; б – BD-ZB P80; в – BD-ZB P120**

В результате дисперсионного анализа установлено (см. п. 2.5.2), что от продольной подачи поперечная шероховатость не зависит (таблица 5.30).

Заключение о значимости влияния рассматриваемого фактора  $\Delta Y$ ,  $n$  и  $S$  на величину  $Ra_{non}$  получено с использованием критерия Фишера (см. п. 2.5.2).  $F_{0,95}$  – критерий Фишера при доверительной вероятности 0,95. Этот критерий при степенях свободы  $f_1 = k - 1 = 3$  и  $f_2 = k(n - 1) = 8$  по справочным данным [199] равен  $F_{0,95} = 4,1$ .

Доверительные границы определены как  $\pm S_0 \cdot t$ , где  $t$  – квантиль Стьюдента. При количестве степеней свободы 11:  $t = 2,20$  (см. таблицу 5.30).

**Таблица 5.30 – Результаты дисперсионного анализа зависимостей величины  $Ra_{non}$  от частоты вращения  $n$ , деформации инструмента  $\Delta Y$  и подачи  $S$**

Марка торцевой щетки	Функция	$S_A^2$ , мкм <sup>2</sup>	$S_0^2$ , мкм <sup>2</sup>	$F=S_A^2/S_0^2$	Значимость влияния фактора	Доверительные границы $S_0 \cdot t$ , мкм
BD-ZB P50	$Ra_{non} = f(\Delta Y)$	18,8431	1,30667	14,4207	значимо	$\pm 2,5148$
	$Ra_{non} = f(n)$	2,94222	0,57417	5,1243	значимо	$\pm 1,667$
	$Ra_{non} = f(S)$	0,58222	0,3375	1,7251	не значимо	–
BD-ZB P80	$Ra_{non} = f(\Delta Y)$	0,65639	0,10729	6,1179	значимо	$\pm 0,7206$
	$Ra_{non} = f(n)$	0,56743	0,08	7,0928	значимо	$\pm 0,6222$
	$Ra_{non} = f(S)$	0,24743	0,49354	0,5013	не значимо	–
BD-ZB P120	$Ra_{non} = f(\Delta Y)$	0,12688	0,03083	4,1149	значимо	$\pm 0,3863$
	$Ra_{non} = f(n)$	0,095	0,021875	4,3429	значимо	$\pm 0,3254$
	$Ra_{non} = f(S)$	0,12528	0,38667	0,324	не значимо	–

По полученным экспериментальным зависимостям поперечной шероховатости от деформации щетки  $\Delta Y$  (мм) и частоты ее вращения  $n$  (об/мин) получены уравнения регрессии (согласно п. 2.5):  $Ra_{non} = b_1 \cdot \Delta Y^2 + b_2 \cdot n^2 + b_3 \cdot \Delta Y + b_4 \cdot n + b_5 \cdot \Delta Y \cdot n + b_6$ . (5.80)

Значения коэффициентов  $b_{1-5}$ , и свободного члена  $b_6$  в данном уравнении приведены в таблице 5.31.



Таблица 5.31 – Значения коэффициентов и свободного члена в (5.80)

Коэф- фициент	Щетка		
	BD-ZB P50	BD-ZB P80	BD-ZB P120
$b_1$	2,9	$4 \cdot 10^{-15}$	-0,05
$b_2$	$-2 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$-2 \cdot 10^{-7}$
$b_3$	-2,67	0,64	0,295
$b_4$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
$b_5$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$
$b_6$	-0,712	-0,06	0,32

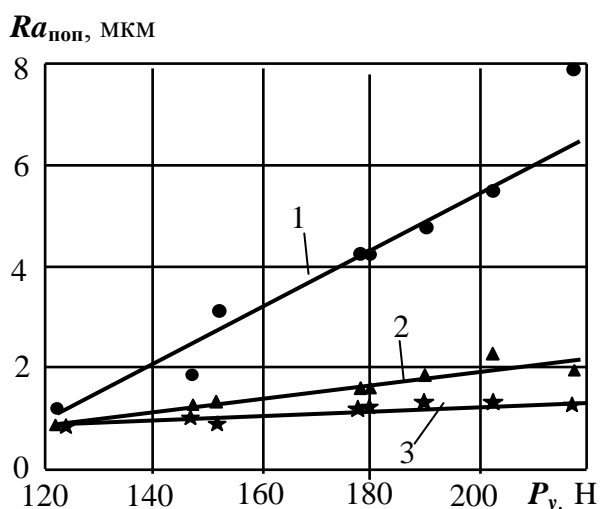


Рисунок 5.37 – Зависимость поперечной шероховатости от силы резания  $P_y$  для щеток: 1 – BD-ZB P50; 2 – BD-ZB P80; 3 – BD-ZB P120

Влияние нормальной к поверхности составляющей силы резания на поперечную шероховатость при различных режимах резания хорошо видно по данным таблицы 5.32.

На рисунке 5.37 приведены зависимости параметра  $Ra_{\text{поп}}$  от нормальной составляющей силы  $P_y$ , возникающей при различных режимах резания. Линейные зависимости свидетельствуют о прямом влиянии сил на шероховатость обработанной поверхности.

Влияние зернистости материала щеток можно проследить по приведенным на рисунках 5.35, 5.36, 5.37 и в таблице 5.32 данным. С уменьшением зернистости с P50 до P120 параметр  $Ra_{\text{поп}}$  уменьшается, поскольку с уменьшением зернистости увеличивается количество зерен, находящихся в контакте, и сила на одном зерне уменьшается.

Таблица 5.32 – Влияние силы резания на шероховатость поверхности при обработке плоскостей торцевыми щетками BD-ZB различной зернистости при  $S = 130$  мм/мин

Режимы обработки		$P_y$ , Н	Поперечная шероховатость $Ra_{\text{поп}}$ , мкм			Продольная шероховатость $Ra_{\text{прод}}$ , мкм		
$n$ , об/мин	$\Delta Y$ , мм		BD-ZB P50	BD-ZB P80	BD-ZB P120	BD-ZB P50	BD-ZB P80	BD-ZB P120
500	1,5	151,76	3,06	1,17	0,95	0,83	0,72	0,64
1000		180,01	4,21	1,60	1,15	1	0,80	0,65
1250		190,76	4,75	1,87	1,21	1,11	0,82	0,65
1600		202,03	5,46	2,31	1,26	1,28	0,84	0,66
1000	0,5	121,01	1,08	0,96	0,95	0,49	0,6	0,60
	1	148,01	1,92	1,28	1,06	0,73	0,7	0,62
	1,5	180,01	4,21	1,6	1,15	1	0,8	0,65
	2	217,01	7,95	1,92	1,21	1,29	0,9	0,68

Влияние режимов обработки на продольную шероховатость, т.е. шероховатость сформированную параллельно направлению движения ворсин щетки, аналогично их влиянию на  $Ra_{\text{поп}}$  и показано на рисунках 5.38 и 5.39. Сопоставление  $Ra_{\text{пр}}$  по щеткам всех зернистостей с силами  $P_y$  по таблице 5.32 показывает, что зависимости продольной шероховатости от силы  $P_y$  также аналогичны зависимостям  $Ra_{\text{поп}}$ .

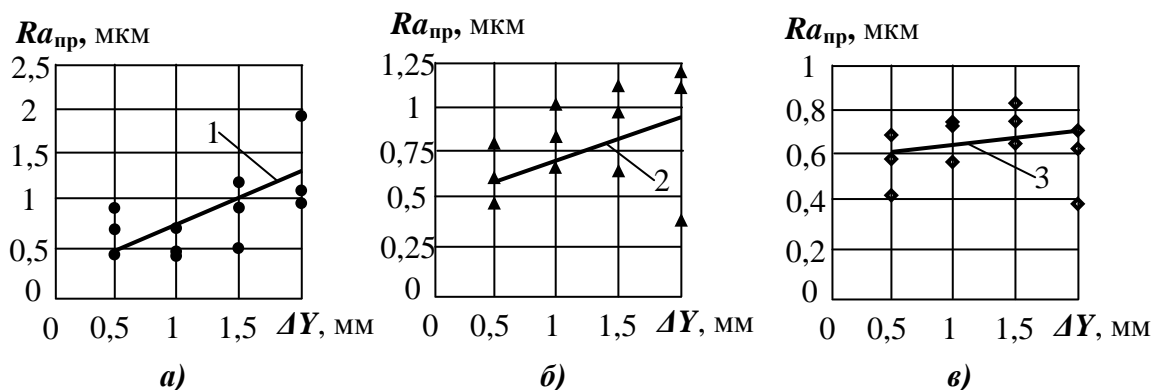


Рисунок 5.38 – Зависимость продольной шероховатости  $Ra$  от деформации  $\Delta Y$  при  $n=1000$  об/мин,  $S = 130$  мм/мин для торцевых щеток: *a* – BD-ZB P50; *б* – BD-ZB P80; *в* – BD-ZB P120

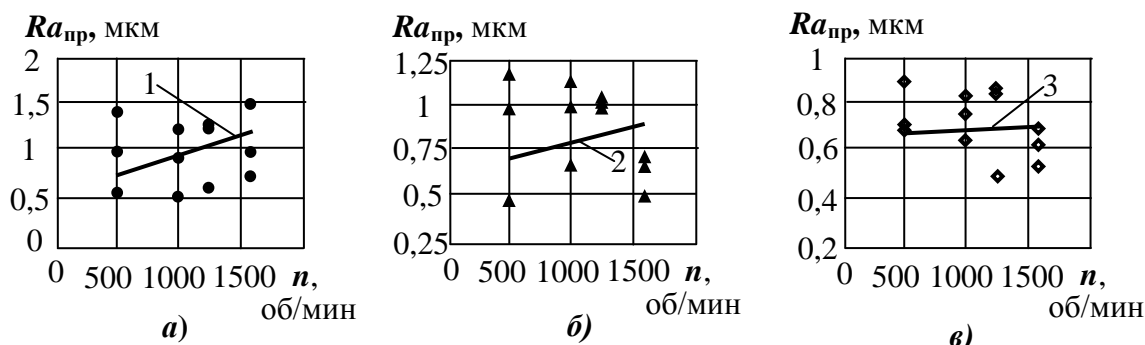


Рисунок 5.39 – Зависимость продольной шероховатости  $Ra$  от частоты вращения  $n$  при  $\Delta Y=1,5$  мм,  $S = 130$  мм/мин для торцевых щеток: *a* – BD-ZB P50; *б* – BD-ZB P80; *в* – BD-ZB P120

По полученным экспериментальным зависимостям продольной шероховатости от деформации щетки  $\Delta Y$  (мм) и частоты ее вращения  $n$  (об/мин) получены уравнения регрессии (согласно п. 2.5):

$$Ra_{np} = d_1 \cdot \Delta Y^2 + d_2 \cdot n^2 + d_3 \cdot \Delta Y + d_4 \cdot n + d_5 \cdot \Delta Y \cdot n + d_6. \quad (5.81)$$

Значения коэффициентов  $d_{1-5}$ , и свободного члена  $d_6$  в данном уравнении приведены в таблице 5.33.

По результатам исследования можно отметить, что применение торцевых полимерно-абразивных щеток для финишной обработки плоскостей является целесообразным. В зависимости от требований по параметрам шероховатости на изделие, можно эффективно управлять процессом за счет режимов обработки и зернистости материала щеток.

Таблица 5.33– Значения коэффициентов и свободного члена в (5.81)

Коэф- фициент	Щетка		
	BD-ZB P50	BD-ZB P80	BD-ZB P120
$d_1$	0,05	$2 \cdot 10^{-15}$	0,01
$d_2$	$1 \cdot 10^{-7}$	$-9 \cdot 10^{-8}$	$-4 \cdot 10^{-9}$
$d_3$	0,405	0,2	0,029
$d_4$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$
$d_5$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$
$d_6$	-0,02	0,29	0,558

В заключение следует отметить, что полученные в результате исследования данные и уравнения регрессии могут быть эффективно использованы для решения практических задач в производственных условиях.

Разработанные эмпирические математические модели производительности процесса обработки и качества обработанных кромок при обработке плоскостей торцевыми полимерно-абразивными щетками, которые являются подсистемами четвертого уровня, следует считать устойчивыми в связи с тем, что воздействие возмущающих факторов (входных параметров) корректируется системой управления, рассмотренной в п. 2.1.2.

### 5.2.3 Математическое моделирование температуры в зоне контакта торцевой полимерно-абразивной щетки с обрабатываемой плоскостью

Как показали проведенные исследования, полимерно-абразивные торцевые щетки могут эффективно применяться для финишной обработки поверхностей. Однако такой инструмент со связкой из полимера очень чувствителен к температуре, возникающей в процессе обработки. Высокая температура может привести к оплавлению поверхностного слоя ворсин, что недопустимо. Поэтому при назначении режимов обработки необходимо учитывать температуру, возникающую при резании.

Для исследования использовали торцевые щетки Scotch-Brite™: BD-ZB Bristle P50; BD-ZB Bristle P80; BD-ZB Bristle P120 Ø115 мм компании 3М [270] с зернистостью P50, P80 и P120 (см. рисунок 2.12). Щетка содержит 540 ворсин, расположенных в 36-и рядах, в каждом ряде по 15 ворсин, длина ворсины 20 мм. В качестве обрабатываемого материала принят высокопрочный алюминиевый сплав В95пчТ2, широко применяемый в авиастроении.

Процесс теплообразования при обработке плоскостей полимерно-абразивными торцевыми щетками происходит в результате взаимодействия вращающейся полимерно-абразивной щетки с обрабатываемой поверхностью.

Общая тепловая мощность процесса  $Q_m$  (Вт) возникает вследствие преобразования механической работы в теплоту, т.е.:

$$Q_m = P_x \cdot V_X + P_y \cdot V_Y + P_z \cdot V_Z, \quad (5.82)$$

где  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  – составляющие силы резания по осям X, Y и Z, Н;

$V_x$ ,  $V_y$  и  $V_z$  – скорость движения источника по осям X, Y и Z, м/с.

Приходная часть теплового баланса, согласно [60, 201], при механической обработке, к которой относится обработка эластичными полимерно-абразивными щетками, может быть представлена как теплота, которая эквивалентна работе деформации и теплоты, то есть эквивалентная работе трения на каждом из  $m$  участков, где она возникает.

Расходная часть теплового баланса процесса обработки плоскости полимерно-абразивными торцевыми щетками можно записать (согласно [207]) следующим уравнением:

$$Q_m = Q_d + Q_{щ} + Q_c + Q_{ж},$$

где  $Q_d$ ,  $Q_{щ}$ ,  $Q_c$ ,  $Q_{ж}$  – доли тепла, идущие, соответственно, в деталь, щетку, стружку, охлаждающую жидкость.

В связи с тем, что исследование обработки полимерно-абразивными торцевыми щетками проводилось без охлаждения, всухую, доля тепла, идущая в охлаждающую жидкость из формулы исключается. Расчетами, проведенными Сипайловым В.А. [209], установлено, что доля тепла, идущего в круг при шлифовании обычным абразивным инструментом, составляет не более 1%. При обработке щетками эта составляющая еще меньше и ею можно пренебречь. Доля тепла, идущая в стружку по данным [207] при обычном плоском торцевом шлифовании составляет всего 3%. При обработке полимерно-абразивными щетками образуются очень мелкие частицы материала и количество тепловой энергии в стружку будет мало, поэтому этой составляющей можно пренебречь.

Метод источников заключается в том, что в основе математических расчетов лежит описание температурного поля, которое возникает вследствие действия теплоты, вносимое импульсом точечного источника, в неограниченном теле. При рассматриваемом методе обработки в роли единичного источника следует рассматривать площадку контакта ворсины эластичной полимерно-абразивной щетки с обрабатываемой поверхностью. Согласно [60, 201], интенсивность источника  $q_{\text{инт}}$  (Вт/м<sup>2</sup>) можно выразить следующим образом:

$$q_{\text{инт}} = \frac{Q_m}{F_k}, \quad (5.83)$$

где  $F_k$  – площадь касания щетки с обрабатываемой заготовкой, м<sup>2</sup>;

При наличии теплообмена с окружающей средой и установившемся процессе, вышеописанное температурное поле выражается [60, 201]:

$$\Theta(x, \infty) = \frac{q_{\text{инт}}}{2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\beta}} \exp \left[ -x \cdot \sqrt{\frac{\beta}{\omega}} \right], \quad (5.84)$$

где  $\Theta(x, \infty)$  – температура точки тела с координатами  $x$ ,  $\infty$ , возникающая при воздействии источника тепла, °С;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого тела, Вт/(м·°С);

$\omega$  – коэффициент температуропроводности тела, в котором движется источник, м<sup>2</sup>/с;

$$\beta = \frac{2 \cdot a \cdot pr}{c \gamma_p \cdot F_k}, \quad (5.85)$$

где  $a$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$pr$  – периметр фигуры поверхности касания щетки с обрабатываемой заготовкой, м;

$c \gamma_p$  – коэффициент объемной теплоемкости ( $c$  – удельная массовая теплоемкость,  $\gamma_p$  – плотность), Дж/(м<sup>3</sup>·°С);

$x$  – расстояние от края источника тепловой энергии до точки, в которой определяется температура, м.

**Скорость** движения источника тепловой энергии в (5.82) зависит от положения кромки обрабатываемой детали относительно оси щетки (размер  $A$  на рисунке 5.24). При входе щетки в процесс обработки плоскости размер  $A$  колеблется от 51,5 мм до 0, затем от 0 до – 51,5 мм. Поскольку скорость зависит от радиуса, на котором расположены ворсины, расчет необходимо производить по среднему радиусу.

При  $A < r_{щ}$  средняя скорость определится как:

$$\left. \begin{aligned} V_X &= \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + r_{щ}) \cdot \sin \delta_{ср}, \\ V_Y &= \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + r_{щ}), \\ V_Z &= \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + r_{щ}) \cdot \cos \delta_{ср}. \end{aligned} \right\} \quad (5.86)$$

При  $A \geq r_{щ}$  средняя скорость будет равна:

$$\left. \begin{aligned} V_X &= \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + A) \cdot \sin \delta_{ср}, \\ V_Y &= \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + A), \\ V_Z &= \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + A) \cdot \cos \delta_{ср}. \end{aligned} \right\} \quad (5.87)$$

**Средневзвешенный угол**  $\delta_{ср}$  между осью  $Z$  и направлением скорости движения  $V$  источника тепловой энергии в уравнениях (5.86) и (5.87) определяется как угол между радиусом, проходящим через центр тяжести фигуры CDE (рисунок 5.40), и осью  $X$ .

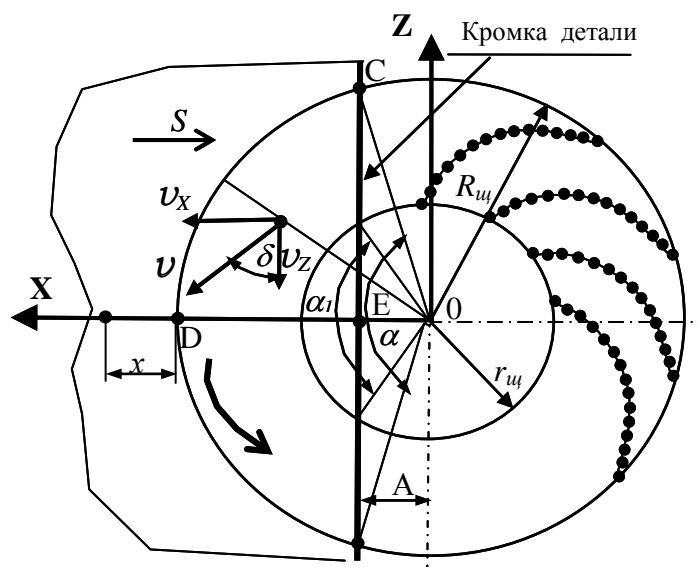
$$\text{При } A < r_{щ}: \delta_{ср} = \frac{F_k}{R_{щ}^2 - r_{щ}^2}, \quad (5.88)$$

где  $F_k$  – площадь, находящаяся в контакте:  $F_k = \frac{R_{щ}^2}{4} (\alpha - \sin \alpha) - \frac{r_{щ}^2}{4} (\alpha_1 - \sin \alpha_1)$ ,

где  $\alpha = 2 \arccos \frac{A}{R_{щ}}$ ;  $\alpha_1 = 2 \arccos \frac{A}{r_{щ}}$ .

$$\text{При } A \geq r_{щ}: \delta_{ср} = \frac{F_k}{R_{щ}^2 - A^2}, \quad (5.89)$$

где  $F_k = \frac{R_{щ}^2}{4} (\alpha - \sin \alpha) - \frac{1}{2} (\delta_{ср} \cdot R_{щ}^2 - A^2 \cdot \operatorname{tg} \delta_{ср})$ . Принято, что  $\delta_{ср} \approx \operatorname{tg} \delta_{ср}$ .



**Рисунок 5.40 – Схема к определению средневзвешенного угла между осью Z и направлением скорости**

Средний угол  $\delta_{cp}$ , площадь  $F_k$  и периметр поверхности контакта приведены в таблице 5.34.

**Таблица 5.34 – Средние значения угла  $\delta_{cp}$ , площадь и периметр поверхности контакта**

Параметр	A, мм			
	0	22	30	38
$\delta_{cp}$ , град.	45	32,40	21,48	15,28
$F_k$ , м <sup>2</sup>	0,00260752	0,001653043	0,001223436	0,0006419318
$pr$ , м	0,300752	0,213571	0,182638	0,145711

Коэффициент теплоотдачи  $a$  характеризует интенсивность передачи тепловой энергии от источника к обрабатываемой заготовке. Как отмечено в работе [201], этот показатель зависит от ряда факторов: объема тела, его конфигурации, характера соприкосновения с другим телом, температуры и свойств окружающей среды, а также от параметров процесса обработки (частоты вращения щетки и ее деформации).

Учитывая многообразие факторов, влияющих на величину  $a$ , решено определить данный коэффициент опытным путем. В результате получена зависимость величины  $a$  от частоты вращения  $n$  (мин<sup>-1</sup>), деформации щетки по оси Y –  $\Delta Y$  (мм) и подачи  $S$  (мм/мин):

$$a = (d_1 \cdot n^2 + d_2 \cdot n + d_3)(d_4 \cdot \Delta Y^2 + d_5 \cdot \Delta Y + d_6)(d_7 \cdot S^2 + d_9 \cdot S + d_9) \quad (5.90)$$

Значения коэффициентов и свободных членов уравнения (5.90) приведены в таблице 5.35.

**Таблица 5.35 – Значения коэффициентов и свободных членов в (5.90)**

Обозначение	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$
Величина	$8,999 \cdot 10^{-6}$	$-4,553 \cdot 10^{-3}$	4,926	1,7733	-6,7066
Обозначение	$d_6$	$d_7$	$d_8$	$d_9$	–
Величина	7,07	$4,5289 \cdot 10^{-5}$	$-4,0816 \cdot 10^{-3}$	0,7652	–

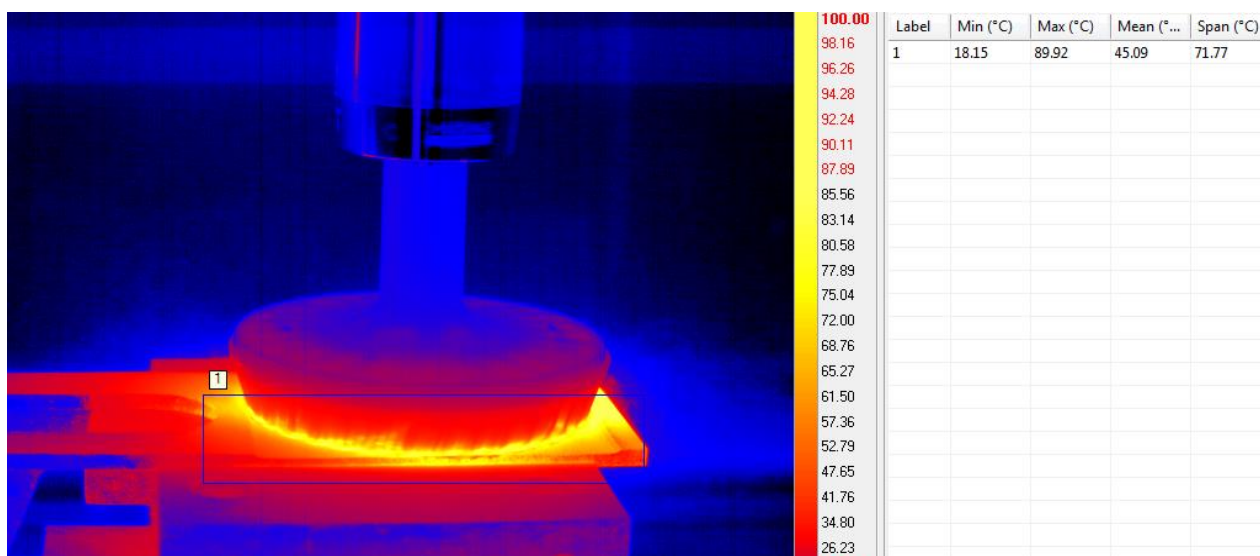
Расчет температуры на поверхности контакта торцевой полимерно-абразивной щетки с обрабатываемой плоскостью  $\Theta_T$  на расстояниях от кромки щетки  $x = 0$ ,  $x = 5$  мм и  $x = 10$  мм. проведен при следующих условиях:

**Исходные данные:** 1. Обрабатываемый материал: высокопрочный алюминиевый сплав В95пчТ2:  $\lambda = 155,03$  Вт/(м·°С),  $c_{\gamma p} = 54892,6$  Дж/(м<sup>3</sup>·°С),  $\omega = 5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с,  $a$  – по уравнению (5.90).  
2. Сила резания  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  – по п. 5.2.1, принятые как среднеарифметические для трех щеток: BD-ZB Bristle P50; BD-ZB Bristle P80; BD-ZB Bristle P120, отличающиеся только зернистостью материала ворсин.

Результаты расчета температуры по предложенной методике приведены в таблице В.28 приложения В.

Для подтверждения адекватности разработанных теоретических положений возникновения температуры в зоне резания при обработке плоских поверхностей торцевыми полимерно-абразивными щетками, проведены экспериментальные исследования температуры при  $x = 0$  с использованием тепловизора FLIR Orion серии SC7000M (см. рисунок 2.26).

В качестве примера, на рисунке 5.41 показано изображение, полученное с помощью данного оборудования. При анализе полученных изображений, фиксировалась наибольшая температура в зоне, обозначенной на рисунке 5.41 цифрой 1.



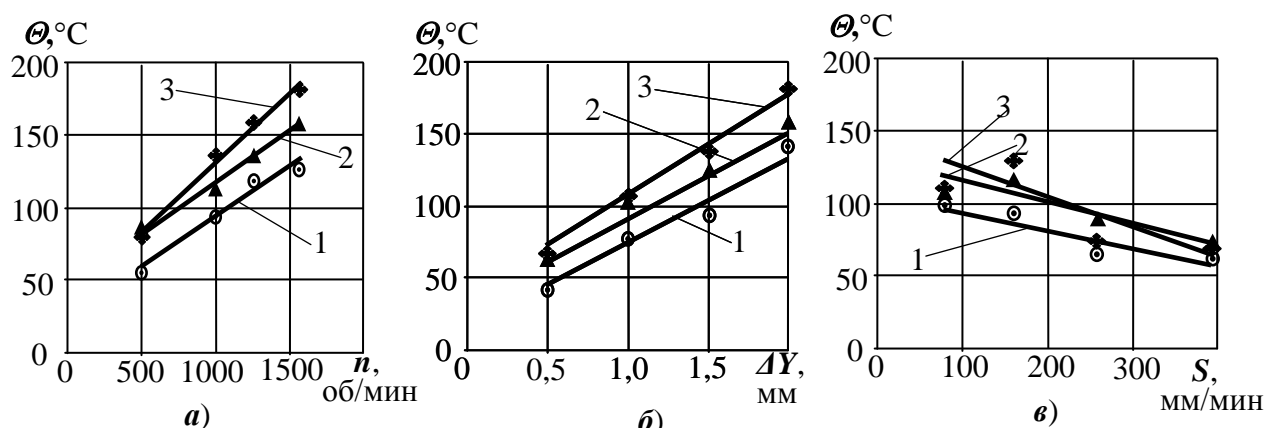
**Рисунок 5.41 – Изображение процесса обработки плоскости торцевой полимерно-абразивной щеткой, полученное при помощи высокоскоростной тепловизионной камеры FLIR Orion серии SC7000M**

На рисунке 5.42, а приведены зависимости температуры от частоты вращения щетки, а в таблице В.28 приложения В – теоретические  $\Theta_T$  и экспериментальные  $\Theta_S$  значения температур в зоне резания. Установлено, что температура с увеличением частоты вращения растет, поскольку скорость движения источника (согласно (5.82) непосредственно влияет на тепловую

мощность процесса  $Q_m$ . Кроме того, с увеличением скорости растут и все составляющие силы резания  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$ , входящие в уравнение (5.82).

Установлено (рисунок 5.42, б), что с увеличением деформации круга  $\Delta Y$  температура растет. Это связано с увеличением сил резания  $P_y$ ,  $P_x$  и  $P_z$ , которые влияют на механическую мощность процесса.

С увеличением подачи (рисунок 5.42, в) температура в зоне обработки падает, поскольку с ростом подачи уменьшается время контакта щетки с обрабатываемой плоскостью.



○ – BD-ZB P50, ▲ – BD-ZB P80, ◆ – BD-ZB P120

1 - BD-ZB P50, 2 - BD-ZB P80, 3 - BD-ZB P120.

**Рисунок 5.42 – Зависимости температуры в зоне резания от: а – частоты вращения  $n$  при  $\Delta Y=1,5$  мм,  $S=130$  мм/мин; б – деформации щетки  $\Delta Y$  при  $n=1000$  об/мин,  $S=130$  мм/мин; в – подачи  $S$  при  $n=1000$  об/мин,  $\Delta Y=1,5$  мм для торцевых щеток**

Необходимо отметить, что на рисунке 5.42 точками нанесены экспериментальные данные, а линиями – рассчитанные теоретически.

Для упрощения использования полученных результатов в производственных условиях, полученные теоретические зависимости температуры в зоне резания от режимов обработки аппроксимированы уравнениями (В.3), которые приведены в п. В.10 приложения В. Данные зависимости справедливы для исследованных в настоящей работе полимерно-абразивных щеток при обработке ими плоских поверхностей деталей из сплава В95ПчТ2.

В заключение следует отметить, что предложенные математические модели для расчета температуры в зоне резания адекватно отражает реальный процесс. Доверительные границы отклонений статистически обработанных экспериментальных от теоретически полученных данных при доверительной вероятности  $P=0,95$  определены в соответствии с методикой, описанной в п. 2.5 и составляют  $\pm 1,8$  °C.

При назначении режимов обработки недопустимо, чтобы температура резания оказалась выше температуры плавления полимерной связки круга. Например, температура плавления полиамида-6 и капрона – 215°C, полиуритана – 175°C, полистирола – 220°C. Как показали экспериментальные исследования, температура плавления материала исследованных полимерно-



абразивных инструментов (Scotch-Brite) близка температуре плавления вышеуказанных материалов и составляет порядка 180-200 °С.

#### 5.2.4 Износ ворсин торцевой щетки при обработке поверхностей

Износ ворсин при зачистке поверхностей торцевыми полимерно-абразивными щетками входит в систему управления финишной обработки (рисунок 2.2), как подсистема четвертого уровня и учитывается при оптимизации процесса обработки.

Для определения износа ворсин при обработке поверхностей необходимо воспользоваться зависимостью интенсивности износа ворсин от нормальной составляющей силы  $P_y$  при обработке кромок  $I_g$  (уравнение (5.61)). При обработке поверхностей, износ при контакте ворсины с обрабатываемой поверхностью  $I_{в.пл}$  определится по выражению:  $I_{в.пл} = b_1 \cdot P_y^2 + b_2 \cdot P_y$ , (5.91) где  $P_y$  – сила, определяемая по формуле (В.2) (см. п. В.8 приложения В) и пересчитанная на одну ворсину;  $b_1, b_2$  – коэффициенты (см. таблицу 5.20).

Износ ворсины зависит от продолжительности ее контакта с обрабатываемой поверхностью. Продолжительности контакта, пропорциональные величинам перемещения, при обработке кромок и поверхностей разные.

Поэтому интенсивность износа ворсины определится по выражению:  $I_{пл} = \frac{I_{в.пл} \cdot L_{щ}}{W_z}$ , (5.92)

где  $W_z$  – перемещение ворсины за период контакта с кромкой (см. рисунок 5.3), которое определяется по выражению:  $W_z = \sqrt{2l_b \cdot \Delta Y - \Delta Y^2}$ ;

$L_{щ}$  – перемещение ворсины за период ее контакта с обрабатываемой поверхностью.

При  $A < r_{щ}$ :  $L_{щ} = \frac{\pi}{360} (R_{щ} \cdot \alpha + r_{щ} \cdot \alpha_1)$ ,

при  $A \geq r_{щ}$ :  $L_{щ} = \frac{\pi \cdot R_{щ} \cdot \alpha}{360}$ ,

где  $\alpha$  и  $\alpha_1$  – углы контакта щетки с обрабатываемой поверхностью (см. рисунок 5.40).

$$\alpha = 2 \arccos \frac{A}{R_{щ}}; \quad \alpha_1 = 2 \arccos \frac{A}{r_{щ}}.$$

В таблице В.30 (п. В.11 приложения В), в качестве примера, приведены результаты расчета износа торцевых щеток по (5.91) и интенсивности износа по (5.92) при обработке поверхностей на различных режимах обработки.

## Результаты и выводы по главе 5

1. Математическое моделирование процесса скругления кромок и зачистки поверхностей торцевыми полимерно-абразивными щетками, являющееся реализацией системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки в пространстве состояний, позволяет решить проблемы управления производительностью процесса обработки и качеством обработанных кромок и поверхностей.
2. Разработанные теоретические положения силового взаимодействия ворсин торцевых полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой плоскостью и кромкой позволяют аналитически объяснить характер влияния режимов обработки на производительность процесса и качество поверхностей и кромок, а также позволяют определить требуемую мощность оборудования для выполнения технологических операций. При этом обосновано, что сила взаимодействия в данном случае состоит из ударной и упругой составляющей.
3. Доказано, что режимные параметры обработки при обработке кромок торцевыми полимерно-абразивными щетками влияют на производительность процесса (при обработке кромок:  $Z_k$  – средняя арифметическая по измеренным значениям  $X$  и  $Y$ , а также  $p$  – величина притупления кромки; при зачистке плоскостей:  $Q$  – относительный съём). С увеличением частоты вращения и деформации производительность процесса обработки увеличивается, с увеличением подачи – уменьшается.
4. Установленные закономерности влияния режимных параметров обработки на шероховатость обработанной поверхности, выраженные в виде уравнений регрессии, позволяют использовать их при оптимизации процесса обработки торцевыми полимерно-абразивными щетками с целью обеспечения требуемой шероховатости.
5. Допустимыми, из условий стабильной работоспособности исследованных щеток, параметрами по деформации инструмента и скорости резания являются:  $\Delta Y = 0,5 - 2,5$  мм,  $V = 15 - 700$  м/мин. Подача  $S$  выбирается в зависимости от требуемой производительности процесса и возможностей оборудования.
6. Экспериментально исследованная температура (в пределах допустимой деформации ворсин и частоты вращения) в зоне обработки при скруглении кромок и теоретически исследованная при обработке плоскостей торцевыми полимерно-абразивными щетками имеет следующие значения:  $20 - 65^\circ\text{C}$  – при обработке кромок на образцах из сплавов В95пчТ2 и ВТ20 и  $50 - 153^\circ\text{C}$  – при зачистке поверхностей на образцах из В95пчТ2. Эти значения ниже допустимых температур для полимерной связки исследованных щеток.
7. Информация об интенсивности износа торцевых полимерно-абразивных щеток, полученная при экспериментальных исследованиях, предназначена для оптимизации процесса обработки кромок по критерию «минимум себестоимости выполнения операции».

8. При разработке технологических процессов, результаты проведенных исследований позволяют обоснованно выбрать оборудование для выполнения данной финишной операции или дать рекомендации по проектированию специального оборудования.
9. Применение торцевых полимерно-абразивных щеток целесообразно при обработке труднодоступных участков деталей. Смещение оси щетки относительно обрабатываемой кромки, исследованное в зависимости от параметров обработки, позволяет существенно расширить ее технологические возможности.
10. Установлено, что точность обработанной кромки торцевыми полимерно-абразивными щетками соответствует требованиям отраслевого стандарта авиационной промышленности ОСТ 1.00022-80, по которому предусмотрено: «притупление кромок, размеры которых не указаны на чертеже, выполнять фаской от 0,1 до 0,4 мм». Если на чертеже указаны предельные размеры кромок или радиусов скругления, то предусмотренные предельные отклонения притупленных кромок (наружных радиусов скругления и высот фасок) по всем классам точности ( $\pm 0,2$  и  $\pm 0,4$  мм) успешно выполняются согласно ГОСТ 30893.1-2002.
11. Достижимая шероховатость (в пределах допустимых деформации и скорости резания) при обработке торцевыми полимерно-абразивными щетками кромок образцов из сплава В95пчТ2 составляет:  $Ra\ 1,4 - Ra\ 2,7$ ; при обработке ВТ20 –  $Ra\ 0,7 - Ra\ 3,0$ , что не превышает допустимых значений, регламентированных НТД, у большинства деталей каркаса самолета.

## 6 Механизация и автоматизация финишной обработки деталей с применением полимерно-абразивного инструмента<sup>1</sup>

Механизация и автоматизация процессов финишной обработки деталей успешно решается с применением промышленных роботов и специального оборудования.

Учитывая особенности обработки поверхностей на роботах, связанные с низкой жесткостью крепления шпинделя по сравнению с обычными металлорежущими станками и возможностью появления колебательных явлений при обработке, необходимо провести специальные исследования обработки кромок с применением промышленного робота.

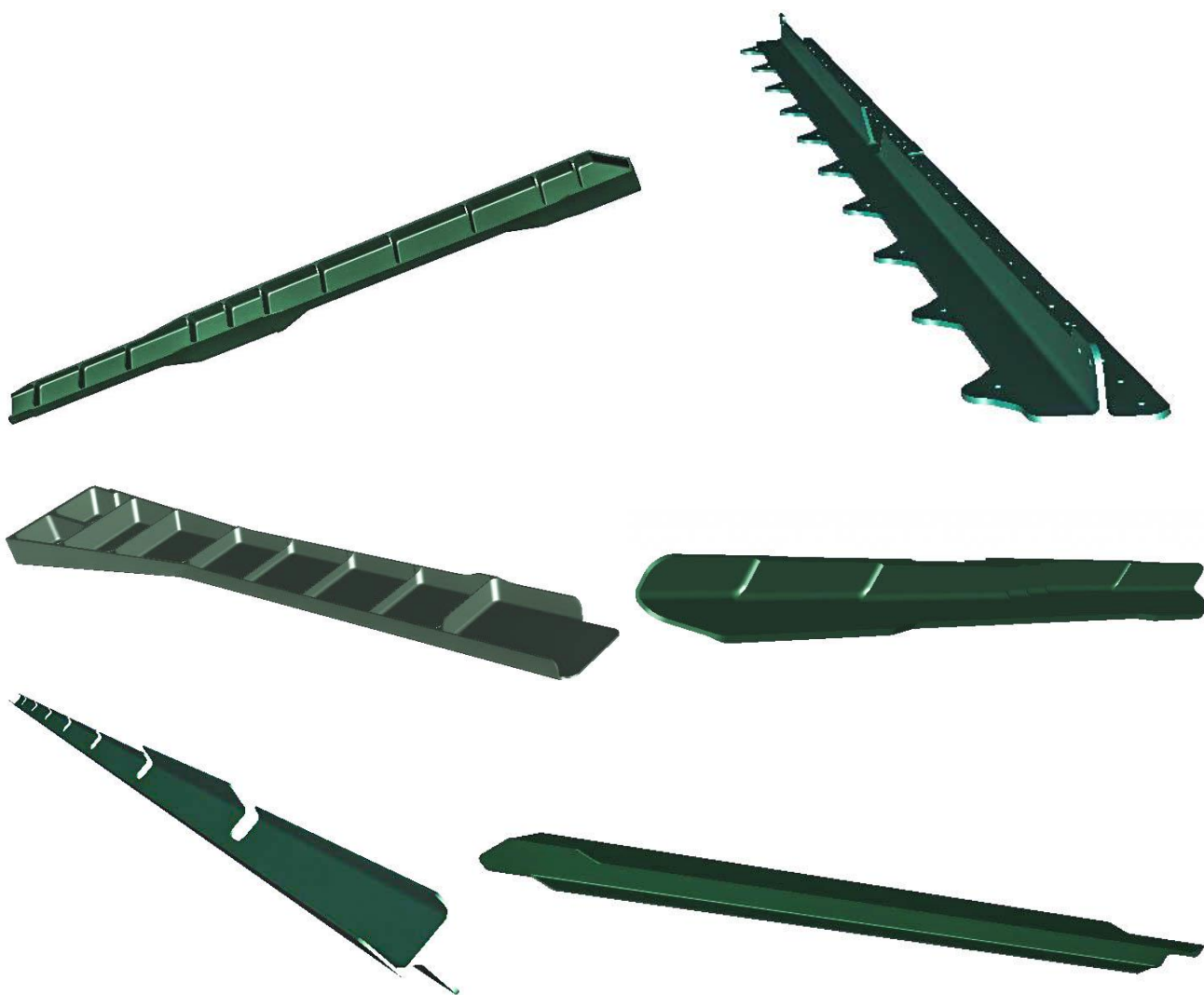


Рисунок 6.1 – Примеры типовых конструкций длинномерных деталей самолетов

<sup>1</sup> Основные результаты данных исследований опубликованы автором лично и в соавторстве в работах [186, 351, 352]

При этом режимные параметры обработки по деформации инструмента, скорости резания (частоте вращения для торцевых щеток) и подаче при исследованиях целесообразно принять завышенными по сравнению с допустимыми, установленными исследованиями, приведенными в главах 4 и 5. Это необходимо для выяснения влияния завышенных режимов на качество обработанной поверхности в связи с низкой жесткостью робототехнического комплекса и возможностью в перспективе использования новых, более стойких инструментов.

Как было отмечено ранее, проблема механизации и автоматизации финишных операций (зачистка поверхностей, скругление острых кромок и т. п.) для таких отраслей промышленности как самолето- и вертолетостроение является весьма актуальной. На рисунках 2.14, 2.15 и 2.16 представлены эскизы опытных образцов, в которых представлены возможные сочетания поверхностей, встречающихся на авиационных деталях, в том числе на длинномерных типа профилей. На рисунке 6.1 показаны примеры конструкций таких длинномерных авиационных деталей самолетов (типа стрингер и лонжерон).

Технология обработки кромок при сочетании различных поверхностей на подобных деталях будет зависеть от используемого оборудования, выбора инструмента, режимов и стратегий обработки.

## **6.1 Технология роботизированной обработки кромок на авиационных деталях**

Исследования проводились на робототехническом комплексе (далее – РТК), который включает в себя:

- промышленный робот KUKA KR 210 R2700 EXTRA (Германия) (см. рисунок 2.18);
- электрошпиндель производства Elettromeccanica Giordano Colombo (Италия) модели RC90 (рисунок 2.19);
- стол производства Forster (Германия) размерами 4000x1500 мм.

*Балансировка инструмента* проводилась с целью минимизации возможной вибрации в процессе обработки на модульной балансировочной системе Haimer TD2009 Comfort Plus (Германия), показанной на рисунке 2.20. Балансировка проводилась по ГОСТ ИСО 1940-1-2007 «Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. Часть 1. Определение допустимого дисбаланса» по классу точности балансировки G6,3.

### **6.1.1 Полимерно-абразивные инструменты, применяемые на РТК**

#### ***Полимерно-абразивные щетки***

Полимерно-абразивные щётки, являются весьма эффективными инструментами для скругления острых кромок на деталях в самолетостроении, ракетостроении и других отраслях машиностроения, что подтверждается собственными исследованиями в этой области (см. главы

4 и 5). В настоящее время щётки выпускаются рядом фирм, например, компанией 3М (Minnesota Mining and Manufacturing Company) [270], компанией С. Hilzinger-Thum [298], фирмой August Rugeberg PFERD-Werkzeuge [323], фирмой OSBORN International [322], компанией LIPPERT UNIPOL [196], компанией HOFFMANN GROUP [300], фирмой Hommel Hercules Werkzeughandel [301], компанией Eisenblatter [290] и др.

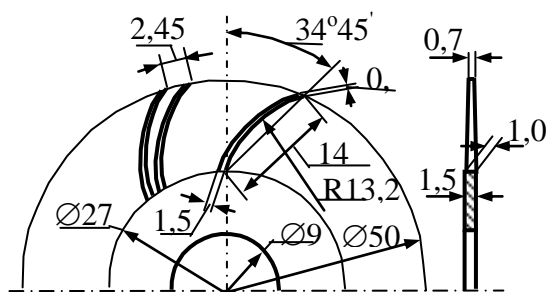


Рисунок 6.2 – Диск щётки С ВВ-ZB Ø50, 64 ворсины

При исследованиях использовались радиальные щётки компании 3М марок С ВВ-ZB с изогнутыми ворсинами Ø 150 мм (135 ворсин) (рисунок 4.1) и Ø 50 мм (рисунок 6.2) и А ВВ-ZB – с прямыми ворсинами (90 ворсин) (рисунок 4.2). Щётки Scotch-Brite™ Bristle выпускаются в виде тонких дисков из полимерного материала с гибкими ворсинами по окружности. По всему объему полимера равномерно распределены зерна высокопроизводительного и износостойкого абразивного материала 3М™ Cubitron™ [270]. Химический состав двух марок материала Cubitron™ приведен в п. Д.1 приложения Д. Из нескольких дисков, показанных на рисунках 4.1, 6.2 и 4.2 на оправке собирается щетка необходимой ширины.

Основные параметры радиальных полимерно-абразивных щеток приведены в таблице 6.1.

Обозначения в таблице 6.1:  $R_{из}$  – радиус по наружной поверхности;  $r_{из}$  – радиус начала ворсин;  $l_в$  – длина ворсины;  $d_к$  – диаметр отверстия;  $\beta$  – угол наклона ворсины к оси щетки.

Таблица 6.1 – Параметры радиальных щёток

Марка щётки	Зернистость	$E$ , Н/мм <sup>2</sup>	$J_{хсп}$ , мм <sup>4</sup>	Плотность $\rho$ , г/мм <sup>3</sup>	$R_{из}$ , мм	$r_{из}$ , мм	$l_в$ , мм	$d_к$ , мм	$\beta$ , °
С ВВ-ZB	P120	268,1	0,3098	1,586	76	50	31,5	50,8	45°30'
С ВВ-ZB	P220	252,5		1,510					
С ВВ-ZB	P400	235,6		1,647					
А ВВ-ZB	P36	318,4	1,162	1,667	76	45	33	50,8	21°30'
А ВВ-ZB	P50	311,3		1,545					
С RB-ZB	P80,	–	–	–	37,5	–	–	9	–
	P120, P220	–	–	–	25	13,5	14		34°45'

В таблице 6.2 приведены характеристики полимерно-абразивных торцевых щёток компании 3М. Конструкция торцевой щетки Ø115 мм показана на рисунке 5.1, торцевой щетки Ø 75 мм – на рисунке 6.3, торцевой щетки Ø 50 мм – на рисунке 6.4.

Щетка Ø115 мм состоит из 36-и рядов, в ряду 15 ворсин, всего 540 ворсин.

Щетка Ø50 мм содержит 6 рядов в 1-ом ряду 27 ворсин, во 2-ом – 33, в 3-ем – 38, в 4-ом – 45, в 5-ом – 52, в 6-ом – 58.

Щетка  $\varnothing 75$  мм содержит 8 рядов в 1-ом ряде 42 ворсин, во 2-ом – 49, в 3-ем – 56, в 4-ом – 62, в 5-ом – 68, в 6-ом – 75, в 7-ом – 80, в 8-ом – 86.

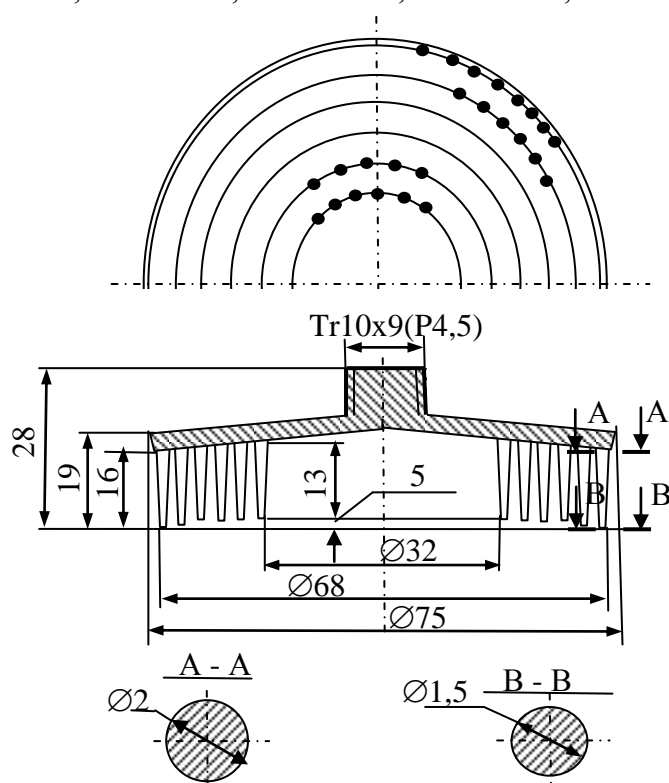


Рисунок 6.3 – Торцевая щетка  $\varnothing 75$  мм состоит из 8-и рядов и 518-и ворсин

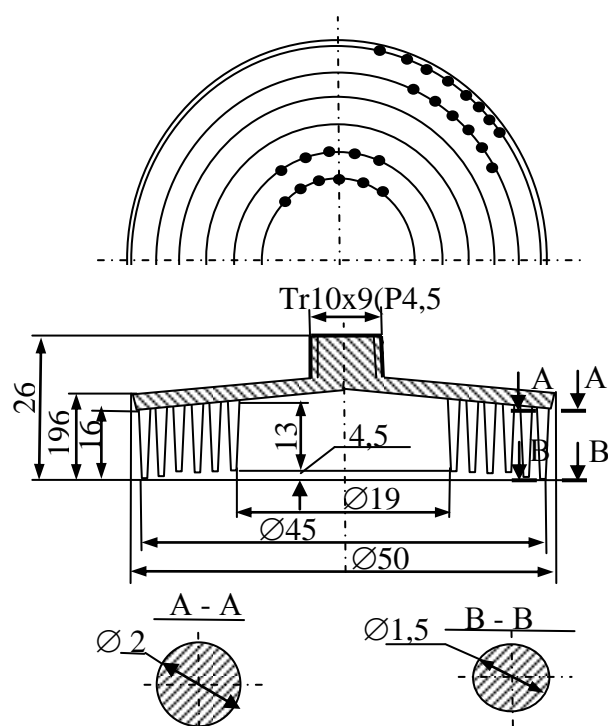


Рисунок 6.4 – Торцевая щетка  $\varnothing 50$  мм состоит из 6-и рядов и 253-х ворсин

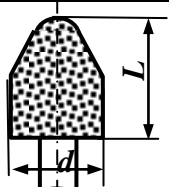
Таблица 6.2 – Характеристики торцевых щёток

Обозначение	Зернистость	$E$ , Н/мм <sup>2</sup>	Диаметр, мм	Рекомендуемая частота вращения, об/мин
Scotch-Brite™ BD-ZB	P50	412,68	115	6000
	P80	452,8		
	P120	452,8		
Scotch-Brite™ Bristle RD-ZB	P50	263,5	75	10000
	P80			
	P120			
	P50	102,8	50	15000
	P80			
	P120			

### Шлифовальные колпачки

Бесшовные шлифовальные колпачки компании Hoffmann Group (Германия) [300] насаживаются на резиновую головку и надежно удерживаются при вращении, быстро и легко меняются (накручиванием/ скручиванием по шлицам держателей № 553100 с оправкой  $\varnothing 6$  мм).

Таблица 6.3 – Шлифовальные колпачки Hoffmann Group (Германия) [300]

	Диаметр, длина, форма	0511G	0713G	1319G	1626G
	Зернистость (код)	80 (553220) , 150 (553240), 320 (5533260)			
	Диаметр, мм	5	7	13	16
	Длина, мм	11	13	19	26
	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	40000	30000	16000	12000

### Конусы шлифовальные

По ГОСТ 22774–77 конусы изготавливаются из шлифовальной шкурки по ГОСТ 5009–82, ГОСТ 10054–82, ГОСТ 6456–82, ГОСТ 13344–79 и нормативно-технической документации.

Шлифовальные конусы выпускаются полные К и усеченные КУ.

Конструкция конусов типа К представлена на рисунке 6.5, а усеченных конусов – на рисунке 6.6. Размеры приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Конусы шлифовальные

Размеры конусов типа К			Размеры усеченных конусов		
D, мм		L (пред. Откл. ±5), мм	D (пред. Откл. ±2), мм	L (пред. Откл. ±1), мм	D (пред. Откл. ±1), мм
Номин.	Пред. Откл.				
25, 30	±2	50, 60, 80	40, 45	100, 140, 145	32, 35
40, 50	±5				

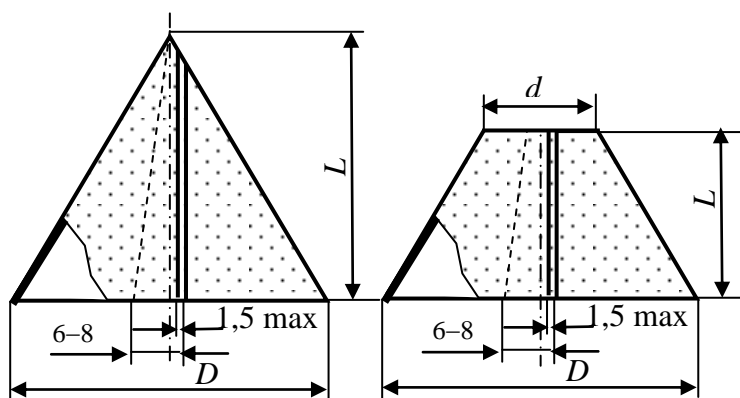


Рисунок 6.5 – Конструкция конусов типа К      Рисунок 6.6 – Конструкция конусов типа КУ

### 6.1.2 Производительность и качество при обработке кромок с применением РТК

Экспериментальные исследования проводились на образцах из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2 и титанового сплава ВТ20 (см. рисунки 2.14 – 2.16) с применением РТК на обучающем режиме программирования процесса обработки.

Размеры обработанной кромки  $X$ ,  $Y$  и  $p$  (см. рисунок 4.11) измерялись на большом инструментальном микроскопе БМИ-1Ц (см. рисунок 2.22). Шероховатость поверхности кромки измерялась на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1 (см. рисунок 2.24).

Производительность процесса обработки кромок оценивается средней величина размера кромки по осям  $X$  и  $Y - Z_k$ , которая определяется по выражению (4.19).



## Обработка радиальными щетками $\varnothing 150$ мм ВВ-ZB Type A P50 и ВВ-ZB Type C P120

Характер взаимодействия ворсин радиальных щеток с обрабатываемой кромкой показан на рисунке 4.10, в результате которого формируется кромка, показанная на рисунке 4.11, а.

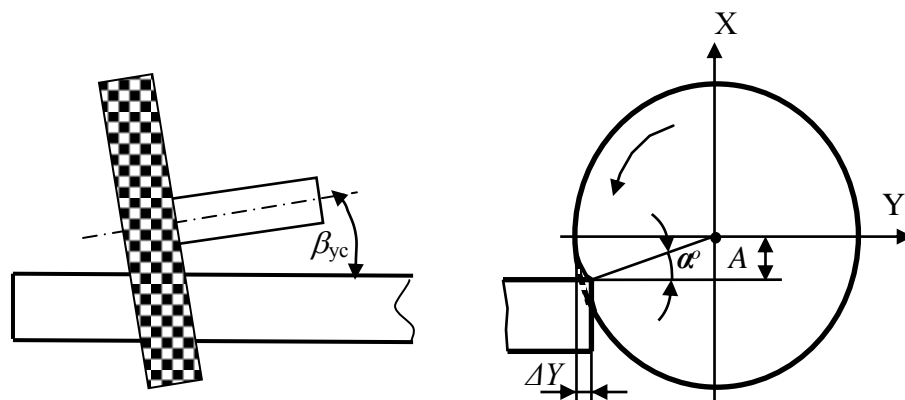
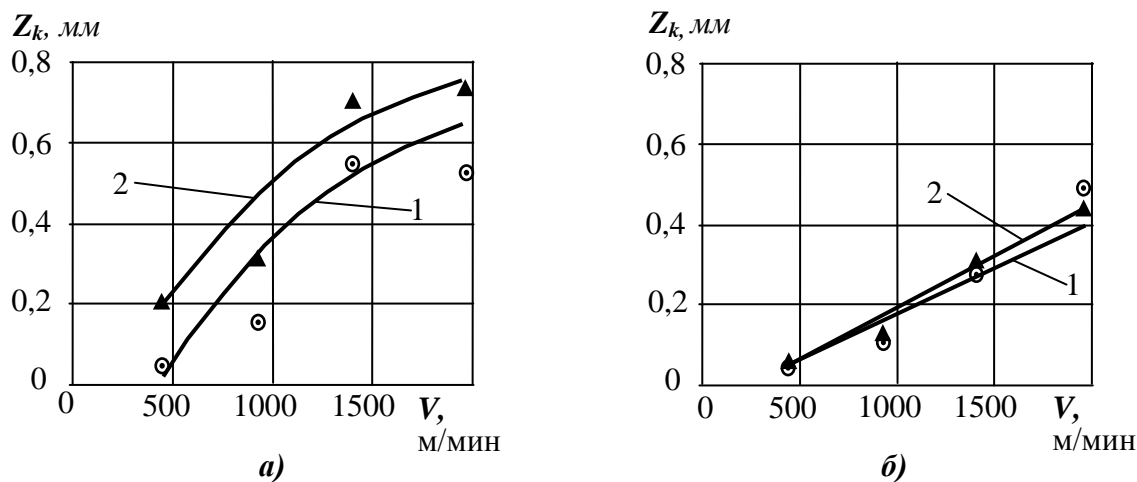


Рисунок 6.7 – Схемы к определению параметров  $\alpha$ ,  $\Delta Y$  и  $\beta$

Зависимости скорости резания  $V$ , деформации щетки  $\Delta Y$  (рисунок 6.7) и подачи  $S$  на размер кромки по параметру  $Z_k$  приведены на рисунках 6.8, 6.9 и 6.10.

Установлено, что, при неизменных деформации щетки и подачи, с увеличением скорости (см. рисунок 6.8) производительность процесса растет. Это связано с увеличением количества режущих зерен, проходящих в единицу времени по обрабатываемой поверхности, и ростом силы резания.

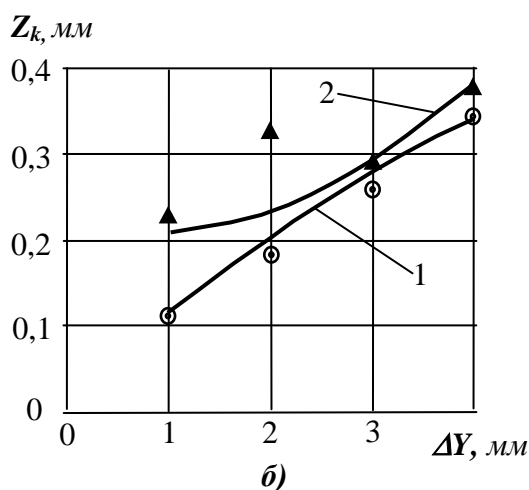
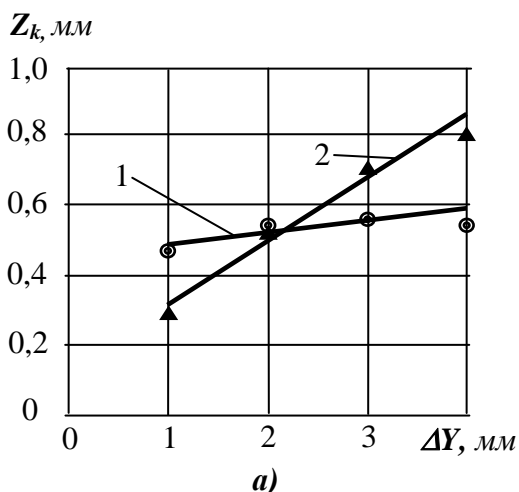


1 – ВВ-ZB Type A P50 при  $A=0$  мм; 2 – ВВ-ZB Type C P120 при  $A=-10$  мм.

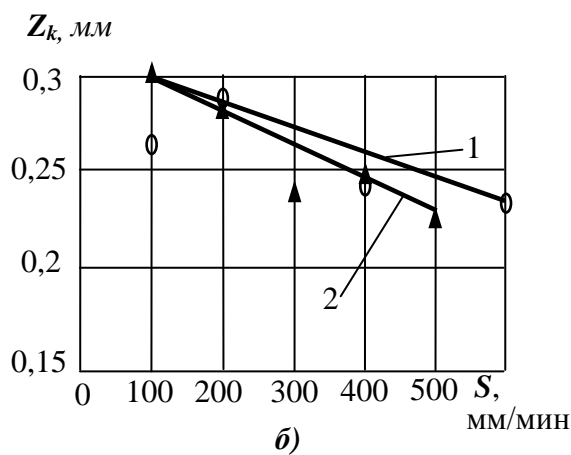
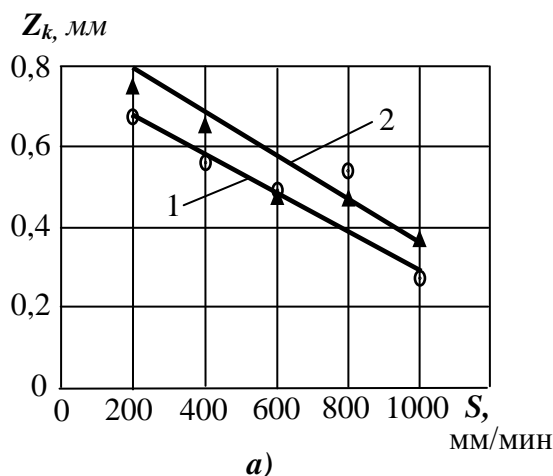
Рисунок 6.8 – Зависимости  $Z_k$  от скорости резания радиальной щетки при  $\Delta Y=3$  мм;  $\beta=10^\circ$ : а – для В95пчТ2 при  $S=400$  мм/мин; б – для VT20 при  $S=200$  мм/мин

С ростом деформации щетки (см. рисунок 6.9), размер кромки увеличивается как для сплава В95пчТ2, так и для сплава VT20 из-за увеличения действующей силы.

Влияние подачи на производительность процесса обработки представлено на рисунке 6.10. С увеличением подачи размер обработанной кромки уменьшается. Изменением подачи легко управлять процессом достижения требуемого размера кромки.



1 – ВВ-ZB Type A P50 при  $A=0$  мм; 2 – ВВ-ZB Type C P120 при  $A=-10$  мм.  
**Рисунок 6.9** – Зависимости  $Z_k$  от деформации радиальной щетки при  $V=1413,72$  м/мин;  $\beta=10^\circ$ : а – для В95пчТ2 при  $S=400$  мм/мин; б – для VT20 при  $S=200$  мм/мин



1 – ВВ-ZB Type A P50 при  $A=0$  мм; 2 – ВВ-ZB Type C P120 при  $A=-10$  мм.  
**Рисунок 6.10** – Зависимости  $Z_k$  от подачи радиальной щетки при  $V=1413,72$  м/мин;  $\Delta Y=3$  мм;  $\beta=10^\circ$ : а – для В95пчТ2; б – для VT20

Заключение о значимости влияния рассматриваемого фактора  $\Delta Y$ ,  $V$  и  $S$  на величину  $Z_k$  получено с использованием критерия Фишера (см. п. 2.5.2).  $F_{0,95}$  – критерий Фишера при доверительной вероятности 0,95. Этот критерий при степенях свободы  $f_1 = k - 1 = 3$  и  $f_2 = k(n - 1) = 8$  по справочным данным [199] равен  $F_{0,95} = 4,1$ .

Доверительные границы определены как  $\pm S_0 \cdot t$ , где  $t$  – квантиль Стьюдента. При количестве степеней свободы 11:  $t = 2,20$  (таблица 6.5).

По полученным экспериментальным данным при соответствующей статистической обработке (см. п. 2.5) разработано уравнение регрессии (6.1) для определения размера кромки  $Z_k$  в зависимости от скорости  $V$ , деформации щетки  $\Delta Y$ , подачи  $S$  и угла наклона оси щетки  $\beta$ .

Необходимость в наклоне оси щетки  $\beta$  возникает при обработке длинномерных деталей типа профилей в самолетостроении с целью исключения касания головки электрошпинделя обрабатываемой детали.

Таблица 6.5 – Результаты дисперсионного анализа зависимостей величины  $Z_k$  от скорости резания  $V$ , деформации инструмента  $\Delta Y$  и подачи вдоль кромки  $S$

Марка щетки	Обрабатываемый материал	Функция	$S_A^2, \text{мм}^2$	$S_0^2, \text{мм}^2$	$F=S_A^2/S_0^2$	Значимость влияния фактора	Доверительные границы $S_0 \cdot t, \text{мм}$
ВВ-ZB Тип А P50	В95ПчТ2	$Z_k = f(\Delta Y)$	0,01214	$8,33 \cdot 10^{-5}$	145,7	значимо	$\pm 0,02$
		$Z_k = f(V)$	0,08766	$5 \cdot 10^{-5}$	3025,667	значимо	$\pm 0,01556$
		$Z_k = f(S)$	0,20171	$6,67 \cdot 10^{-5}$	1753,111	значимо	$\pm 0,018$
	ВТ20	$Z_k = f(\Delta Y)$	0,02642	$5 \cdot 10^{-5}$	528,444	значимо	$\pm 0,01556$
		$Z_k = f(V)$	0,10368	$1 \cdot 10^{-4}$	1036,75	значимо	$\pm 0,022$
		$Z_k = f(S)$	0,88675	$1 \cdot 10^{-4}$	886,75	значимо	$\pm 0,022$
ВВ-ZB Тип С P120	В95ПчТ2	$Z_k = f(\Delta Y)$	0,15668	$1,08 \cdot 10^{-4}$	1446,231	значимо	$\pm 0,0229$
		$Z_k = f(V)$	0,21328	$7,5 \cdot 10^{-5}$	2843,667	значимо	$\pm 0,01905$
		$Z_k = f(S)$	$1,986 \cdot 10^{-3}$	$3,33 \cdot 10^{-5}$	59,583	значимо	$\pm 0,0127$
	ВТ20	$Z_k = f(\Delta Y)$	0,01257	$3,33 \cdot 10^{-5}$	377,0	значимо	$\pm 0,0127$
		$Z_k = f(V)$	0,07958	$9,17 \cdot 10^{-5}$	868,121	значимо	$\pm 0,02106$
		$Z_k = f(S)$	$3,552 \cdot 10^{-3}$	$3,96 \cdot 10^{-5}$	89,737	значимо	$\pm 0,01384$

$$Z_k = (a_1 \cdot \Delta Y^2 + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot S^2 + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot V + a_6 \cdot S + a_7 \cdot \Delta Y \cdot V + a_8 \cdot \Delta Y \cdot S + a_9 \cdot V \cdot S + a_{10} \cdot \Delta Y \cdot V \cdot S + a_{11}) \cdot (a_{12} \cdot \beta^3 + a_{13} \cdot \beta^2 + a_{14} \cdot \beta + a_{15}) \quad (6.1)$$

Значения коэффициентов  $a_{1-10}$ , и  $a_{12} - a_{14}$  свободных членов  $a_{11}$  и  $a_{15}$  в данном уравнении приведены в таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Значения коэффициентов и свободных членов в (6.1)

Материал	В95ПчТ2		ВТ20	
	Радиальная ВВ-ZB Тип А P50	Радиальная ВВ-ZB Тип С P120	Радиальная ВВ-ZB Тип А P50	Радиальная ВВ-ZB Тип С P120
$a_1$	-0,01	-0,0175	$-5 \cdot 10^{-3}$	0,0175
$a_2$	$-2 \cdot 10^{-7}$	$-1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$
$a_3$	$-6,5 \cdot 10^{-8}$	$-2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$
$a_4$	0,082	0,2565	0,103	-0,0325
$a_5$	$9 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
$a_6$	$-3,5 \cdot 10^{-4}$	$-5 \cdot 10^{-4}$	$-3 \cdot 10^{-4}$	$-3 \cdot 10^{-4}$
$a_7$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$
$a_8$	$-2,41 \cdot 10^{-9}$	$-2,41 \cdot 10^{-9}$	$-2,41 \cdot 10^{-9}$	$-2,41 \cdot 10^{-9}$
$a_9$	$5,8 \cdot 10^{-11}$	$5,8 \cdot 10^{-11}$	$5,8 \cdot 10^{-11}$	$5,8 \cdot 10^{-11}$
$a_{10}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$
$a_{11}$	-0,3	-0,52	-0,26	-0,06
$a_{12}$	$9,143 \cdot 10^{-8}$	$1,529 \cdot 10^{-6}$	$1,829 \cdot 10^{-8}$	$1,051 \cdot 10^{-6}$
$a_{13}$	$-6,24 \cdot 10^{-5}$	$-1,368 \cdot 10^{-4}$	$-5,95 \cdot 10^{-5}$	$-1,295 \cdot 10^{-4}$
$a_{14}$	-0,013985	-0,016085	-0,012379	-0,01481
$a_{15}$	1,146	1,173	1,13	1,16

Описание исследований влияния деформации щетки  $\Delta Y$ , угла смещения оси щетки относительно кромки  $\alpha$  (см. рисунок 6.7) и угла наклона оси щетки  $\beta$  на такой показатель качества как отклонение месторасположения (позиционирование)  $\delta$  приведено в п. 4.4.

В результате получена зависимость  $\delta$  от деформации щетки  $\Delta Y$  и углов  $\alpha$  и  $\beta$  (4.25).

Оптимальным значением является  $\delta = 0$ . Для получения этого значения необходимо по уравнению (4.25) (при заданном  $\Delta Y$ ,  $\beta$  и  $\delta = 0$ ) определить угол  $\alpha$  по формуле (4.26).

Для получения одинаковых по величине размеров кромок  $Z_k$  как на горизонтальных участках длинномерной детали, так и на наклонных с углом  $\beta$ , назначение режимов обработки следует производить согласно технологическим рекомендациям, приведенным в п. 4.4 (см. главу 4).

При заданных  $Z_k$ ,  $\Delta Y$ ,  $V$  и  $\beta$  требуемая подача  $S$  определяется из (6.1) по формуле:

$$S = \frac{-d + \sqrt{d^2 - 4a_3 \cdot f}}{2a_3}, \quad (6.2)$$

где  $d = a_6 + a_8 \cdot \Delta Y + a_9 \cdot V + a_{10} \cdot \Delta Y \cdot V$ ;

$$f = a_1 \cdot (\Delta Y)^2 + a_2 \cdot V^2 + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot V + a_7 \cdot \Delta Y \cdot V + a_{11} - \left( \frac{Z_k}{a_{12} \cdot \beta^3 + a_{13} \cdot \beta^2 + a_{14} \cdot \beta + a_{15}} \right).$$

Горизонтальная  $S_{\Gamma}$  и вертикальная  $S_B$  составляющие подачи определяются по формулам:

$$S_{\Gamma} = S \cdot \cos \beta, \quad S_B = S \cdot \sin \beta. \quad (6.3)$$

При заданных  $Z_k$ ,  $V$ ,  $S$  и  $\beta$  требуемая деформация  $\Delta Y$  определяется из (6.1) по формуле:

$$\Delta Y = \frac{-g + \sqrt{g^2 - 4a_1 \cdot t}}{2a_1}, \quad (6.4)$$

где  $g = a_4 + a_7 \cdot V + a_8 \cdot S + a_{10} \cdot V \cdot S$ ;

$$t = a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot S^2 + a_5 \cdot V + a_6 \cdot S + a_7 \cdot \Delta Y \cdot V + a_{11} - \left( \frac{Z_k}{a_{12} \cdot \beta^3 + a_{13} \cdot \beta^2 + a_{14} \cdot \beta + a_{15}} \right).$$

### **Обработка торцевыми щетками $\varnothing 115$ мм BD-ZB Bristle P50,**

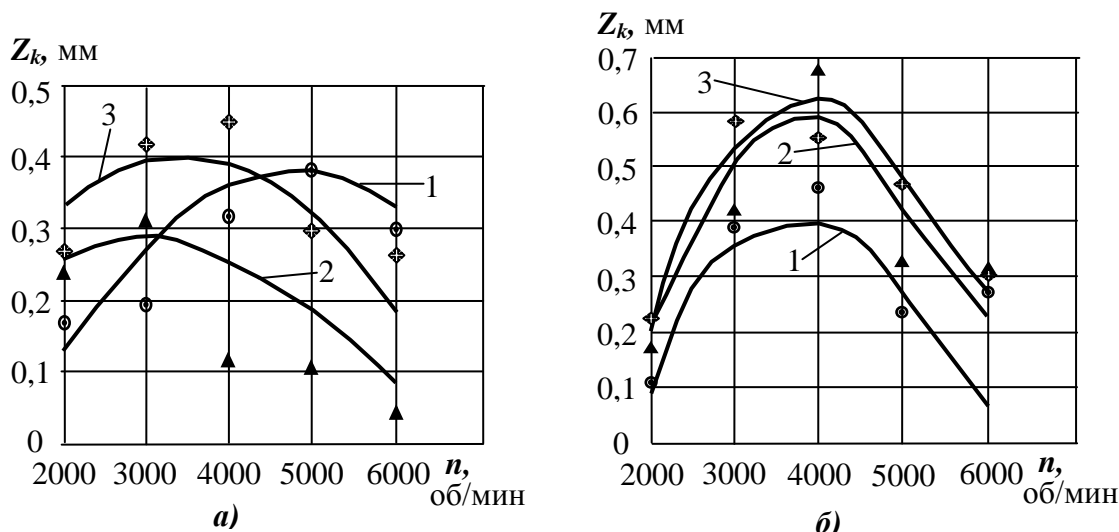
#### **BD-ZB Bristle P80 и BD-ZB Bristle P120**

Исследование обработки кромок на РТК производилось по схеме, приведенной на рисунке 5.8 при размере  $A = 45$  мм.

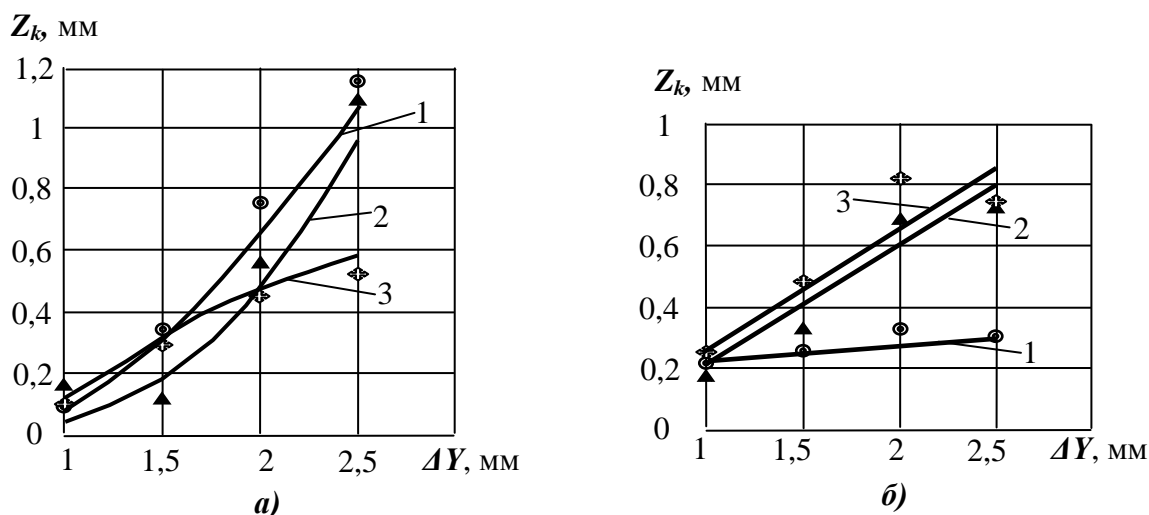
В результате проведенных экспериментов установлены экстремальные зависимости размера кромки от частоты вращения (рисунок 6.11) как при обработке сплава В95пчТ2, так и при обработке сплава ВТ20.

Это связано с запаздыванием распрямления ворсин (из-за упруго-вязких свойств материала ворсины) после прохождения кромки, в результате чего следующее касание происходит при меньшей деформации ворсины, а следовательно при меньшей силе взаимодействия с кромкой.

На основании этих данных следует считать, что частоту вращения свыше 3000 об/мин для материала В95пчТ2 и 4000 об/мин – для материала ВТ20 применять не рекомендуется.



1 – BD-ZB Bristle P50; 2 – BD-ZB Bristle P80; 3 – BD-ZB Bristle P120.  
**Рисунок 6.11 – Зависимости  $Z_k$  от частоты вращения торцевой щетки при  $\Delta Y=1,5$  мм;  $A=45$  мм: а – для В95пчТ2 при  $S=400$  мм/мин; б – для ВТ20 при  $S=200$  мм/мин**



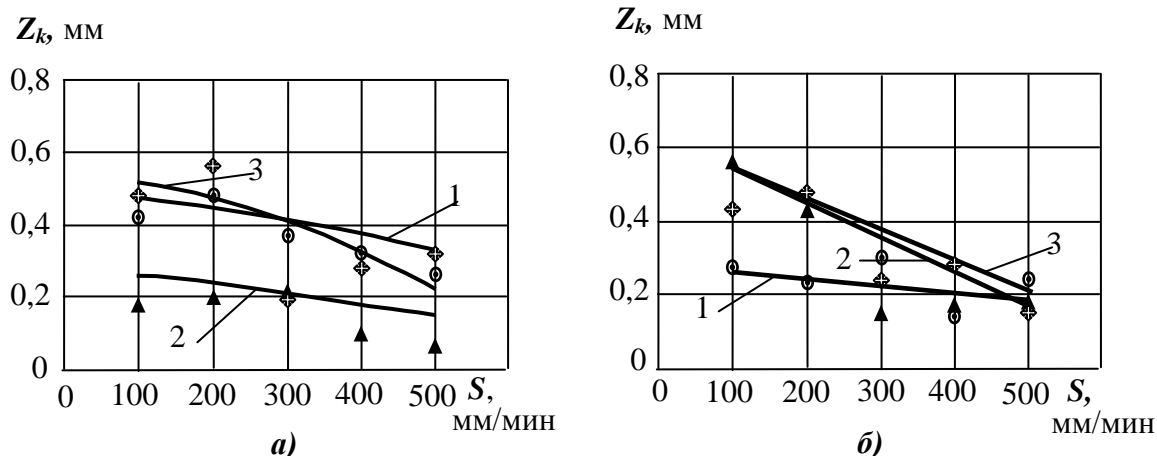
1 – BD-ZB Bristle P50; 2 – BD-ZB Bristle P80; 3 – BD-ZB Bristle P120.  
**Рисунок 6.12 – Зависимости  $Z_k$  от деформации торцевой щетки при  $n=5000$  об/мин;  $A=45$  мм: а – для В95пчТ2 при  $S=400$  мм/мин; б – для ВТ20 при  $S=200$  мм/мин**

Зависимость размера кромки от деформации щетки приведена на рисунке 6.12. С увеличением деформации размер кромки растет в связи с увеличением силы резания.

С увеличением подачи размер кромки уменьшается (рисунок 6.13).

Заключение о значимости влияния рассматриваемого фактора  $\Delta Y$ ,  $n$  и  $S$  на величину  $Z_k$  получено с использованием критерия Фишера (см. п. 2.5.2).  $F_{0,95}$  – критерий Фишера при доверительной вероятности 0,95. Этот критерий при степенях свободы  $f_1 = k - 1 = 3$  и  $f_2 = k(n - 1) = 8$  по справочным данным [199] равен  $F_{0,95} = 4,1$ .

Доверительные границы определены как  $\pm S_0 \cdot t$ , где  $t$  – квантиль Стьюдента. При количестве степеней свободы 11:  $t = 2,20$  (таблица 6.7).



1 – BD-ZB Bristle P50; 2 – BD-ZB Bristle P80; 3 – BD-ZB Bristle P120.  
 Рисунок 6.13 – Зависимости  $Z_k$  от подачи торцевой щетки при  $n=5000$  об/мин;  $\Delta Y=1,5$  мм;  $A=45$  мм: а – для В95ПчТ2; б – для ВТ20

Таблица 6.7 – Результаты дисперсионного анализа зависимостей величины  $Z_k$  от частоты вращения  $n$ , деформации инструмента  $\Delta Y$  и подачи вдоль кромки  $S$

Марка щетки	Обрабатываемый материал	Функция	$S_A^2, \text{мм}^2$	$S_0^2, \text{мм}^2$	$F=S_A^2/S_0^2$	Значимость влияния фактора	Доверительные границы $S_0 \cdot t, \text{мм}$
BD-ZB Bristle P50	В95ПчТ2	$Z_k = f(\Delta Y)$	0,68168	$8,33 \cdot 10^{-5}$	8180,1	значимо	$\pm 0,02$
		$Z_k = f(n)$	0,02872	$4,79 \cdot 10^{-5}$	599,464	значимо	$\pm 0,01523$
		$Z_k = f(S)$	0,01048	$7,83 \cdot 10^{-4}$	13,372	значимо	$\pm 0,06157$
	ВТ20	$Z_k = f(\Delta Y)$	$8,267 \cdot 10^{-3}$	$8,33 \cdot 10^{-5}$	99,2	значимо	$\pm 0,02$
		$Z_k = f(n)$	0,081	$3,33 \cdot 10^{-5}$	2430,0	значимо	$\pm 0,0127$
		$Z_k = f(S)$	0,01046	$3,17 \cdot 10^{-4}$	33,0175	значимо	$\pm 0,03915$
BD-ZB Bristle P80	В95ПчТ2	$Z_k = f(\Delta Y)$	0,57408	$8,33 \cdot 10^{-4}$	688,89	значимо	$\pm 0,06351$
		$Z_k = f(n)$	0,03428	$4,79 \cdot 10^{-5}$	715,406	значимо	$\pm 0,01523$
		$Z_k = f(S)$	$9,275 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	92,75	значимо	$\pm 0,022$
	ВТ20	$Z_k = f(\Delta Y)$	0,20713	$8,33 \cdot 10^{-5}$	2485,6	значимо	$\pm 0,02$
		$Z_k = f(n)$	0,144	$7,75 \cdot 10^{-4}$	185,807	значимо	$\pm 0,06125$
		$Z_k = f(S)$	0,11592	$3,08 \cdot 10^{-4}$	375,955	значимо	$\pm 0,03863$
BD-ZB Bristle P120	В95ПчТ2	$Z_k = f(\Delta Y)$	0,0979	$1 \cdot 10^{-4}$	979,0	значимо	$\pm 0,022$
		$Z_k = f(n)$	0,02401	$3,33 \cdot 10^{-5}$	720,25	значимо	$\pm 0,0127$
		$Z_k = f(S)$	0,08203	$4,5 \cdot 10^{-4}$	182,29	значимо	$\pm 0,04667$
	ВТ20	$Z_k = f(\Delta Y)$	0,21839	$9,17 \cdot 10^{-5}$	2382,394	значимо	$\pm 0,02106$
		$Z_k = f(n)$	0,07959	$8 \cdot 10^{-4}$	99,486	значимо	$\pm 0,06222$
		$Z_k = f(S)$	0,0427	$1,4 \cdot 10^{-3}$	30,498	значимо	$\pm 0,08232$

По полученным экспериментальным данным при соответствующей статистической обработке (см. п. 2.5) получено уравнение для определения размера кромки  $Z_k$  в зависимости от частоты вращения  $n$ , деформации щетки  $\Delta Y$  и подачи  $S$ :

$$Z_k = a_1 \cdot \Delta Y^2 + a_2 \cdot n^2 + a_3 \cdot S^2 + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot n + a_6 \cdot S + a_7 \cdot \Delta Y \cdot n + a_8 \cdot \Delta Y \cdot S + a_9 \cdot n \cdot S + a_{10} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot S + a_{11}. \quad (6.5)$$

Значения коэффициентов  $a_{1-10}$ , и свободного члена  $a_{11}$  уравнения (6.5) приведены в таблице 6.8.

Таблица 6.8 – Значения коэффициентов и свободного члена в (6.5)

Материал Инструмент Коэффициент	В95ПчТ2			ВТ20		
	Торцевая BD-ZB Bristle P50	Торцевая BD-ZB Bristle P80	Торцевая BD-ZB Bristle P120	Торцевая BD-ZB Bristle P50	Торцевая BD-ZB Bristle P80	Торцевая BD-ZB Bristle P120
$a_1$	0,06	0,31	-0,05	-0,01	-0,04	-0,06
$a_2$	$-3,2 \cdot 10^{-8}$	$-2,1 \cdot 10^{-8}$	$-3 \cdot 10^{-8}$	$-1,005 \cdot 10^{-7}$	$-1,18 \cdot 10^{-7}$	$-1,3 \cdot 10^{-7}$
$a_3$	$-6 \cdot 10^{-7}$	$-7 \cdot 10^{-8}$	$-4 \cdot 10^{-7}$	$-2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$-8 \cdot 10^{-7}$
$a_4$	0,486	-0,455	0,475	0,089	0,528	0,618
$a_5$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$8,9 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
$a_6$	$1 \cdot 10^{-4}$	$-1 \cdot 10^{-4}$	$-6 \cdot 10^{-4}$	$-8 \cdot 10^{-5}$	$-1,5 \cdot 10^{-3}$	$-4 \cdot 10^{-4}$
$a_7$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$
$a_8$	$-2,41 \cdot 10^{-9}$	$-3,5 \cdot 10^{-9}$	$-3,5 \cdot 10^{-9}$	$-2,41 \cdot 10^{-9}$	$-3,5 \cdot 10^{-9}$	$-3,5 \cdot 10^{-9}$
$a_9$	$5,8 \cdot 10^{-11}$	$6,5 \cdot 10^{-11}$	$6,5 \cdot 10^{-11}$	$5,8 \cdot 10^{-11}$	$6,5 \cdot 10^{-11}$	$6,5 \cdot 10^{-11}$
$a_{10}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$
$a_{11}$	-1,18	0,15	-0,23	-1,135	-1,52	-1,96

### 6.1.3 Шероховатость и отклонение месторасположения обработанной кромки

#### *Шероховатость обработанной кромки*

Шероховатость поверхности кромки измерялась на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1 (см. рисунок 2.24).

При обработке радиальными щетками ВВ-ZB Type А P50 и ВВ-ZB Type С P120 и торцевыми щетками BD-ZB Bristle P50, BD-ZB Bristle P80 и BD-ZB Bristle P120 с применением РТК, на обработанной кромке формируется шероховатость по параметру  $Ra$ , значения которого при различных скоростях резания, деформациях щетки и подач приведены в таблице 6.9.

Таблица 6.9 – Шероховатость обработанной кромки, полученная при обработке на РТК

Тип щетки	Марка щетки	Обрабатываемый материал			
		В95ПчТ2		ВТ20	
		$Ra_{min}$ , МКМ	$Ra_{max}$ , МКМ	$Ra_{min}$ , МКМ	$Ra_{max}$ , МКМ
Радиальная Ø150 мм	ВВ-ZB Type А P50	0,74	4,04	0,62	2,01
	ВВ-ZB Type С P120	1,02	3,54	0,33	1,16
Торцевая Ø115 мм	BD-ZB Bristle P50	1,45	4,22	0,7	2,64
	BD-ZB Bristle P80	0,65	2,74	0,92	3,05
	BD-ZB Bristle P120	0,88	2,72	0,72	2,85

Наблюдения за обработкой кромок на высоких скоростях резания (до 2000 м/мин при обработке радиальными щетками и до 6000 об/мин – торцевыми щетками) при малой жесткости РТК показали, что процесс идет стабильно при высоком качестве обработанной поверхности. Это дает право утверждать, что РТК может успешно применяться на производстве для финишной об-

работки деталей полимерно-абразивным инструментом с соответствующей балансировкой инструмента.

### ***Отклонение месторасположения (позиционирование)***

Представляет собой относительное отклонение от симметричности расположения радиуса закругления  $\delta$  (4.18).

В связи с тем, что на радиусы скругления предусмотрены допустимые предельные отклонения, на параметр  $\delta$  также имеются допуски.

Например, в самолетостроении по ОСТ 1.00022-80, предусмотрено скругление кромок на деталях: 0,5 мм с допустимыми отклонениями  $\pm 0,2$  мм.

По ГОСТ 30893.1-2002 (ИСО 2768-1-89) предусмотрены предельные отклонения при тупленных кромок (наружных радиусов скругления и высот фасок):

- для точного (f) и среднего (m) классов точности –  $\pm 0,2$  мм;
- для грубого (c) и очень грубого (v) классов точности –  $\pm 0,4$  мм.

В переводе на относительную величину, для классов точности f и m допустимое значение показателя  $\delta$  равно:  $\delta = \frac{T_r}{\bar{X}_{min}} = \frac{0,4}{0,3} = 1,33$ ,

где  $T_r$  – допуск радиуса скругления;  $\bar{X}_{min}$  – наименьший предельный размер радиуса.

Для классов точности c и v –  $\delta = 0,8/0,3 = 2,66$ .

Установлено, что при обработке кромок на РТК радиальной щеткой ВВ-ZB Type A P50 при  $\alpha = 0$  фактическое значение  $\delta$  колеблется в пределах от +0,442 до –0,212; для радиальной щетки ВВ-ZB Type C P120 при  $\alpha = 10^\circ$   $\delta$  колеблется в пределах от +0,919 до +0,27; для торцевых щеток  $\delta$  колеблется в пределах от 0 до –0,866. Такие отклонения вполне допустимы.

### **6.1.4 Технология обработки кромок при сочетании различных поверхностей**

Рассмотрим методы обработки кромок полимерно-абразивными инструментами на образцах (см. рисунки 2.14–2.16), сконструированных с учетом анализа конструктивных особенностей длинномерных авиационных деталей (см. рисунок 6.1).

Рассмотрим случай обработки кромок деталей с закруглениями по радиусу на работе радиальными щетками, в том числе в отверстиях, например, плоской детали (см. рисунок 2.14).

На длинномерных деталях типа профилей оправка, на которой закреплена щетка, выполняется удлиненной и располагается под углом  $\beta_{yc}$  (см. рисунок 6.7) к обрабатываемой детали. Это позволяет избежать касания детали шпиндельной головкой.

### ***Обработка кромки по наружному радиусу***

Обработка кромки на работе радиальными полимерно-абразивными щетками может осуществляться двумя способами.

1. Обработка с поворотом шпиндельной головки по требуемому радиусу по разработанной программе.



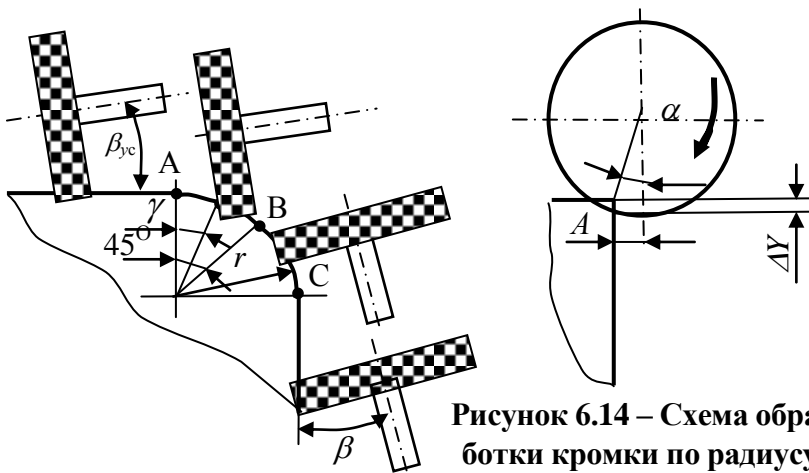


Рисунок 6.14 – Схема обработки кромки по радиусу

2. Обработка без поворота шпиндельной головки. Операция выполняется в два этапа (рисунок 6.14).

На первом этапе обработка производится на участке А–В при одновременной горизонтальной и вертикальной подачах. При этом вертикальная подача  $S_B$  по уравнениям: (6.2) и (6.3) и величина

деформации щетки  $\Delta Y$  (6.4) должны определяться с учетом изменения угла  $\beta$ :

$$\beta = \beta_{yc} + \gamma, \quad (6.6)$$

$$S_{BR} = S_B + (\Delta Y_R - \Delta Y_{yc}), \quad (6.7)$$

где  $\Delta Y_R$  – деформация щетки по (6.4) при  $\beta$  по (6.6) с текущим значением  $\gamma$ ,

$\Delta Y_{yc}$  – деформация щетки по (6.4) при установочном значении  $\beta_{yc}$ .

На втором этапе обработка производится на участке В–С после поворота шпиндельной головки на  $90^\circ$ . При этом вертикальная подача  $S_B$  по уравнениям (6.2) и (6.3) и величина деформации щетки  $\Delta Y$  (6.4) должны определяться с учетом изменения угла  $\beta$  по (6.6):

$$S_{BR} = S_B - (\Delta Y_R - \Delta Y_{yc}), \quad (6.8)$$

#### Обработка кромки в овальном отверстии

При обработке овального отверстия необходимо избежать касания щеткой противоположной кромки. Для этого необходимо определить допустимую ширину отверстия  $B$  (рисунок 6.15) при заданной деформации щетки  $\Delta Y$ , т. е. размер  $B$  должен быть  $B \geq M$ ,

$$M = \frac{L_k}{2} + A, \quad (6.9)$$

где  $L_k = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta Y \cdot R_k - \Delta Y^2}$ ;

$$A = R_k \cdot \sin \alpha, \quad (6.10)$$

$$\Delta Y = R_k - \sqrt{R_k^2 - 0,25L_k^2}.$$

Решая совместно уравнения (6.9) и (6.10), получим:  $M = A + \sqrt{2\Delta Y \cdot R_k - \Delta Y^2}$ .

$$(6.11)$$

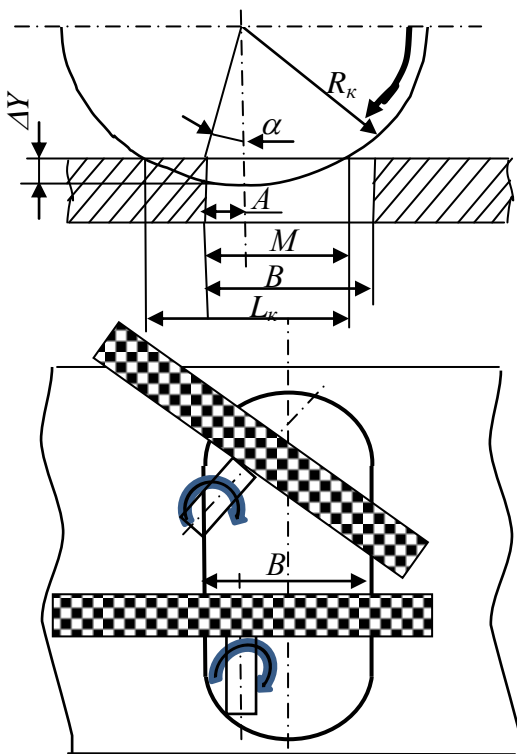


Рисунок 6.15 – Схема обработки кромки овального отверстия

Как видно из уравнения (6.11), допустимая ширина овального отверстия зависит от деформации щетки  $\Delta Y$  и ее радиуса  $R_k$ . Если невозможно изменить радиус щетки, то следует изменить натяг  $\Delta Y$  по формуле:

$$\Delta Y = R_k - \sqrt{R_k^2 - (M - A)^2}. \quad (6.12)$$

Обработка кромки по радиусу необходимо проводить поворотом шпиндельной головки (см. рисунок 6.15) или обрабатывать по методике, рассмотренной на рисунке 6.14.

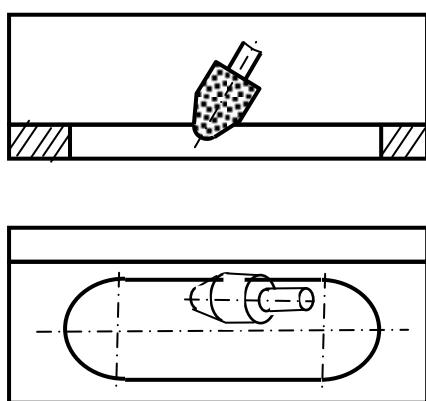
#### **Обработка кромки в овальном отверстии в труднодоступных местах**

На образце (см. рисунок 2.15) имеются отверстия, расположенные близко к стенке детали. В связи с невозможностью обработки кромок полимерно-абразивными щетками, обработка должна производиться инструментом, который не будет касаться прилегающей стенки. Такими инструментами могут быть: шлифовальные колпачки Hoffmann Group (Германия) [300] (см. таблицу 6.3), конусы шлифовальные по ГОСТ 22774–77 (см. таблицу 6.4) или конические борфрезы. Обработка шлифовальным колпачком показана на рисунке 6.16. Наклон колпачка (конуса) позволяет расширить участок инструмента, участвующий в резании.

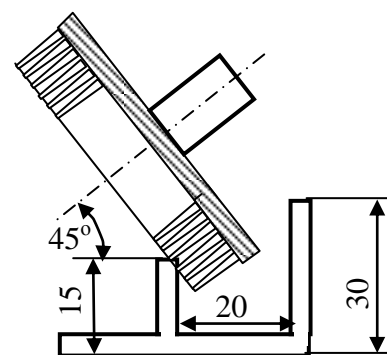
Все остальные кромки на образце (рисунок 2.14) могут быть обработаны радиальными щетками.

#### **Обработка прямолинейной кромки в труднодоступных местах**

На образце (см. рисунок 2.15) такой кромкой является кромка в пазу. Радиальной щеткой такую кромку обработать невозможно. Применение торцевой полимерно-абразивной щетки BD-ZB P50 (рисунок 6.17) позволит успешно выполнить данную операцию.

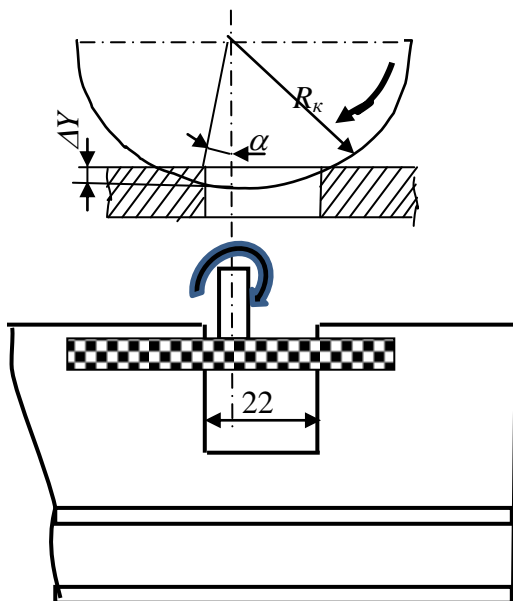


**Рисунок 6.16– Схема обработки кромки шлифовальным колпачком**



**Рисунок 6.17 – Схема обработки труднодоступной прямолинейной кромки**

Обработка узкого паза ( $B = 22$  мм) на образце (см. рисунок 2.16) возможна радиальной щеткой ВВ-ZB А P50  $\varnothing 150$  мм (рисунок 6.18). Для данного паза в соответствии с уравнением (6.3) при  $\alpha = 0^\circ$  допустимая деформация щетки  $\Delta Y$  равна 3,3 мм, что вполне приемлемо.



**Рисунок 6.18 – Схема обработки узкого паза радиальной щеткой**

будет  $M = 14,14$  мм.

В таблице 6.10 приведены варианты обработки узких пазов различными радиальными щетками.

**Таблица 6.10 – Минимально допустимые ширины пазов при обработке кромок на В95пчТ2 радиальными щетками**

Щетка	Диаметр, мм	$\beta, ^\circ$	$\Delta Y, \text{ мм}$	$\Delta Y_{\text{ср}}, \text{ мм}$	$\alpha, ^\circ$	$A, \text{ мм}$	$M, \text{ мм}$	
ВВ-ZB А P50	150	0	2		-9,287	-12,104	5,101	
			3		-7,641	-9,973	11,027	
			4		-4,983	-6,514	17,652	
		10		2		0	0	17,205
				4	24,166			
				6	29,394			
ВВ-ZB С P120	150	0	2		+22,912	+29,177	46,404	
			3		+17,242	+22,231	43,231	
			4		+11,485	+14,933	39,1	
		10		2		13,3	17,254	34,458
				4	41,42			
				6	46,648			
RB-ZB С P80	75	0	2		+22,912	14,599	26,682	
			3		+17,242	11,115	25,812	
			4		+11,485	7,467	24,319	
RB-ZB С P80	50	0	2		+22,912	9,733	19,531	
			3		+17,242	7,41	19,285	
			4		+11,485	4,978	18,542	

Если принять  $\Delta Y = 2$  мм при обработке паза щеткой ВВ-ZB А P50  $\varnothing 150$  мм, то, согласно уравнению (6.11), при  $\alpha = 0^\circ$  минимально допустимая ширина паза составит  $M = 17,26$  мм.

При обработке паза щеткой ВВ-ZB С P120  $\varnothing 150$  мм, согласно уравнению (6.11), при  $\alpha = 10^\circ$  минимально допустимая ширина паза составит  $M = 30,23$  мм.

При обработке щеткой RB-ZB С P80  $\varnothing 75$  мм, согласно уравнению (6.11), при  $\alpha = 10^\circ$  минимально допустимая ширина паза составит  $M = 18,6$  мм. При обработке щеткой RB-ZB С P80  $\varnothing 50$  мм ширина паза

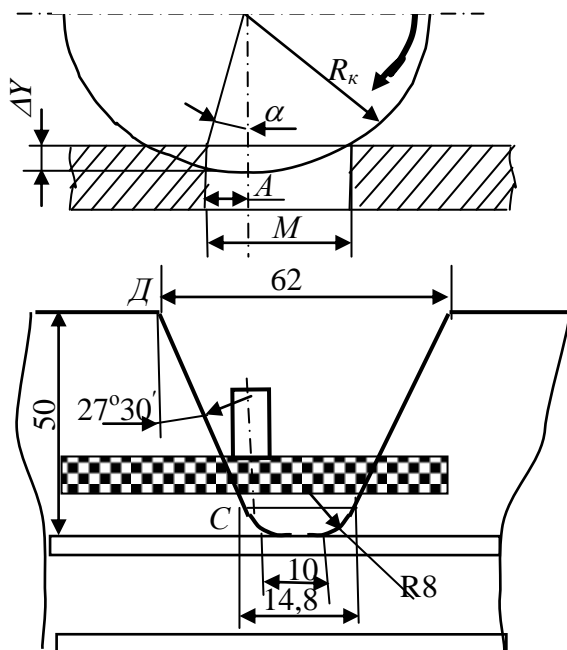


Рисунок 6.19 – Схема обработки наклонной поверхности радиальной щеткой

Обработка кромок на прямолинейных участках, в том числе с наклонными поверхностями до  $\beta \leq 60^\circ$ , рассмотрена в п. 4.4. На образце (см. рисунок 2.15) приведен паз с наклонными поверхностями при  $\beta > 60^\circ$ , касающийся вертикальной стенки. На рисунке 6.19 рассмотрен вариант обработки таких кромок радиальной щеткой ВВ-ZВ А Р50  $\varnothing 150$  мм. Прямолинейный участок СД обрабатывается при  $\beta = 27^\circ 30'$ , деформация щетки, при  $\alpha = 0$  должна быть  $\Delta Y \leq 1,5$  мм.

## 6.2 Установка для обработки кромок на длинномерных деталях типа профилей<sup>2</sup>

По результатам проведенных исследований обработки кромок, разработана конструкция установки, предназначенной для скругления острых кромок полимерно-абразивными щетками на длинномерных авиационных деталях длиной до 10000 мм шириной и высотой до 200 мм.

Технические характеристики установки приведены в таблице 6.11.

Таблица 6.11 – Технические характеристики установки

Характеристика	Значение
<b>Главное движение:</b>	
Количество одновременно работающих шпинделей	2
Диаметр абразивных щёток, мм	150
Ширина рабочей поверхности щёток, мм	12–20
Частота вращения щёток, об/мин	1600
Передача вращения от двигателя на абразивные щётки	Ременная
Мощность двигателей привода главного движения, кВт	0,75
<b>Вертикальное движение:</b>	
Тип привода вертикального движения	ручной, программный
Тип механизма привода вертикального движения	винтовой с электроприводом
Величина вертикального перемещения, мм	200
Максимальный угол наклона кромки, град.	60

<sup>2</sup> Установка разработана в соавторстве с представителями ПАО «Научно-производственная корпорация «Иркут». На данную установку получен патент РФ на полезную модель [83].

<b>Позиционирование щёток:</b>	
Количество координат установочных перемещений (позиционирования) щёток	2
Перемещение при вертикальном позиционировании, мм	200
Перемещение при горизонтальном позиционировании, мм	±180
Максимальная скорость Горизонтального и вертикального перемещений при позиционировании, мм/с	15
<b>Движение подачи:</b>	
Тип механизма подачи	цепной, с электроприводом
Максимальная скорость подачи, мм/с	5
Минимальная скорость подачи, мм/с	1
Диапазон перемещений стола, мм	±2500
Перемещение стола	по рольгангам

### 6.2.1 Устройство установки для обработки кромок

На рисунке 6.20 показан общий вид установки.

Обрабатываемая деталь устанавливается на столе 1 и закрепляется прижимами. Для обработки кромок предусмотрены две щетки с индивидуальными приводами 4. Обработка может производиться одновременно двух кромок. Приводы 4 со щетками могут перемещаться в вертикальном и в горизонтальном (по направляющим траверсы 5) направлениях независимо друг от друга электродвигателями. Механизмы вертикального и горизонтального перемещений приводов 4 установлены на направляющих, закрепленных на портале 3.

Стол, с закрепленной на нем деталью, перемещается по рольгангу 2 цепной передачей от электрического привода. Стойки, на которых установлен рольганг 2, и стойки портала 3 соединены между собой четырьмя стяжками 6.

Траверса (рисунок 6.21) предназначена для размещения механизмов горизонтального и вертикального перемещений обрабатывающих инструментов. Траверса состоит из конструкционного профиля 12 (40x120 L=1100 мм АНАМИР [12]), который закреплен на боковинах портала.

На профиле 12 установлены профильные рельсы 5 (HIWIN HGR20RC длиной 950 мм [299]), по которым перемещаются приводы щеток. Привод щетки закреплен на крепежной плите 1, которая может перемещаться в вертикальном направлении в пределах 200 мм с помощью двигателя 48 (PL57 HD76-08 [329]) и винтовой передачи – винт 9 и гайка 7 (ШВП CD/BO 16x2R [234]) по профильным рельсам 8 (HIWIN HGR20RC длиной 330 мм [299]), закрепленным на вертикальной плите 2.

Горизонтальное перемещение вертикальной плиты 2 в пределах 100 мм осуществляется с помощью двигателя 6 (PL57 HD76-08 [329]) и винтовой передачи – винт 10 и гайка 7 по профильным рельсам 5. Для позиционирования инструмента в горизонтальном направлении предусмотрен механизм, состоящий из швеллеров заднего 3 и переднего 4 и модулей (кареток) 13 (HIWIN HGH20CAZAC [299]). На этом механизме закреплены опоры 11 гаек 7. Данный меха-

низ вместе с приводами щетки может перемещаться до  $\pm 180$  мм с помощью двигателя 6 (PL57 HD76-08 [329]) и винтовой передачи по профильным рельсам 5. При этом двигатель закреплен на конструкционном профиле 12.

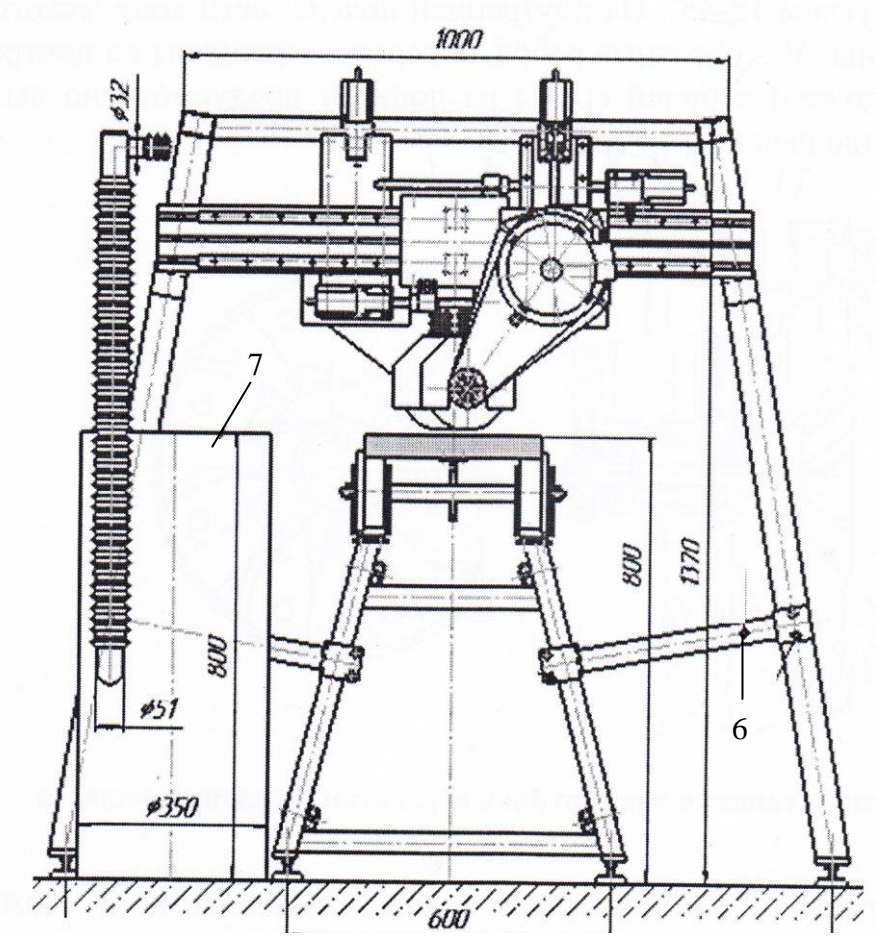
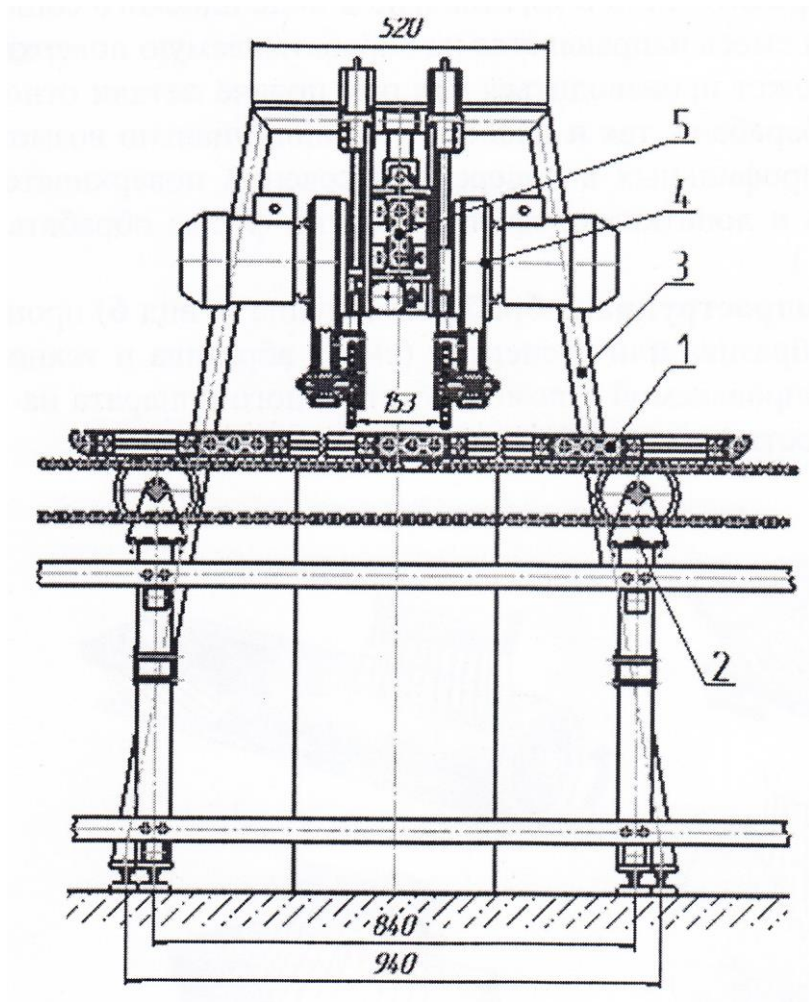
Щетки 1 (рисунок 6.22) устанавливаются относительно обрабатываемой детали 2 на расстояние А между осью щетки и вертикальной поверхностью 3 детали и на величину натяга  $\Delta Y$  с помощью отдельных механизмов для вертикального и горизонтального перемещений с программным управлением. Обрабатываемая деталь 2 базируется относительно стола 4 поверхностью 5 с помощью съемных упоров 6.

Рабочий стол (рисунок 6.23) представляет собой сборную конструкцию, элементы которой изготовлены из стандартных профилей и собраны с помощью стандартных изделий. Между двумя алюминиевыми конструкционными профилями 1 АНАМИР 40x40 (код А02-1 [12]) размещены девять алюминиевых конструкционных профилей 2 АНАМИР 40x120 (код А02-3 [12]) и соединены между собой с помощью стандартных угловых соединителей 3 АНАМИР 40x40 (арт. 1038) [12] болтовыми соединениями.

На торцах рабочего стола установлены алюминиевые конструкционные профили 4 АНАМИР 40x40R (код А02-6) [12] и соединены с профилями 10-ю угловыми соединителями 3 АНАМИР 40x40 (арт. 1038) [12] и болтовыми соединениями. Такая конструкция рабочего стола существенно уменьшает его массу, трудоемкость изготовления и стоимость.

Съемные упоры (не менее трех) для базирования заготовки (рисунок 6.24) состоят из кронштейна 1, закрепленного на рабочем столе 2 с помощью передвижного сухаря 3 АНАМИР паз 10, М8 (арт. 5074) [12] и винта 4. На кронштейне 1 закреплена каретка 5 с нанесенным на ней нониусом с ценой деления 0,05 мм, в которой установлена штанга 6 с миллиметровой шкалой. После установки штанги 6 на требуемый размер она фиксируется в заданном положении винтом 7.

Регулирование расстояния штанги 6 от стола 2 (в зависимости от конструкции обрабатываемой детали) производится путем отклонения кронштейна 1 вправо или влево от вертикального положения и закреплением в требуемом положении винтом 4.



1 – стол; 2 – рольганг; 3 – портал; 4 – привод щетки; 5 – траверса; 6 – стяжка; 7 – система пылеудаления.

**Рисунок 6.20 – Общий вид установки для обработки кромок**



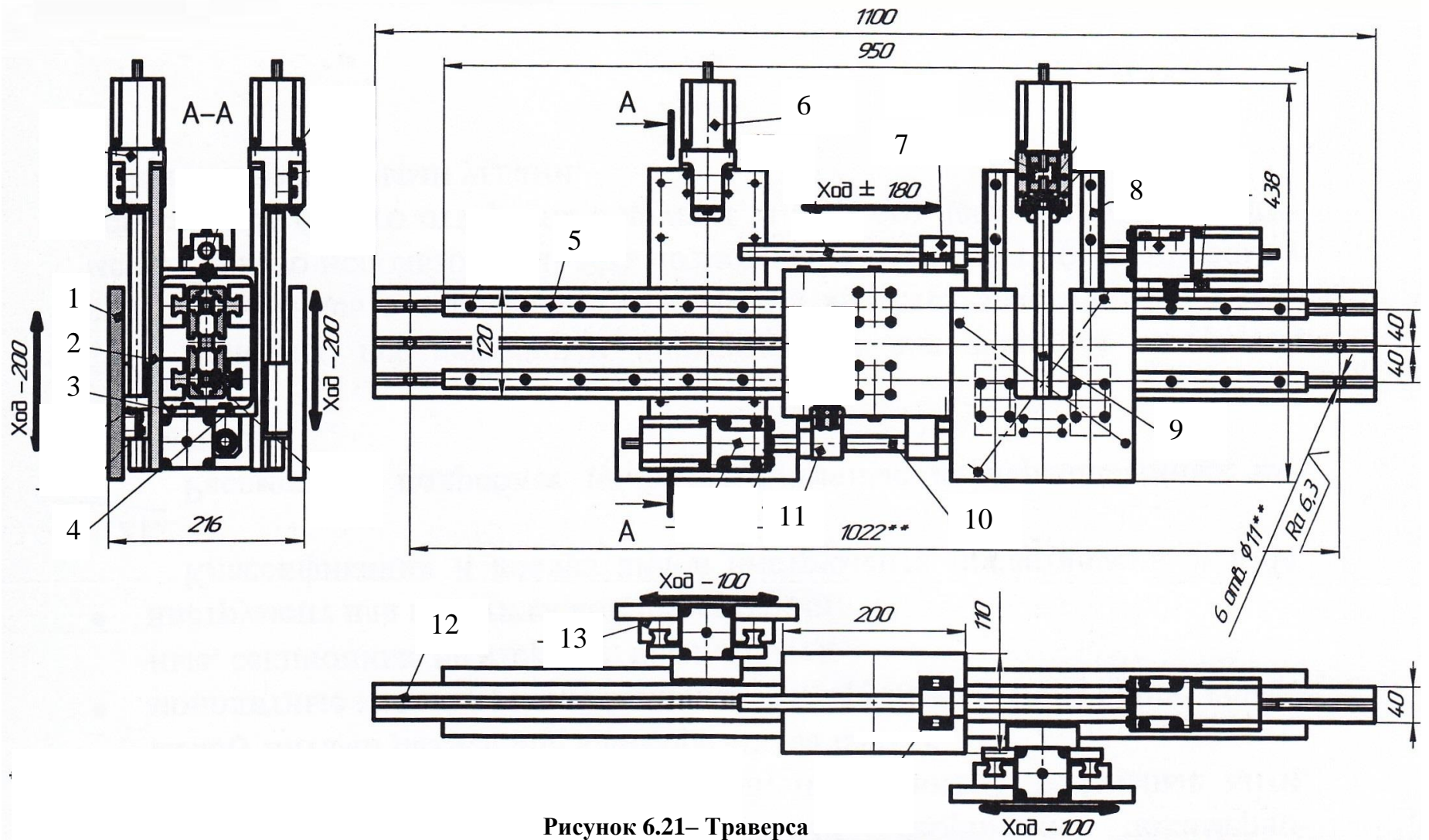


Рисунок 6.21– Траверса



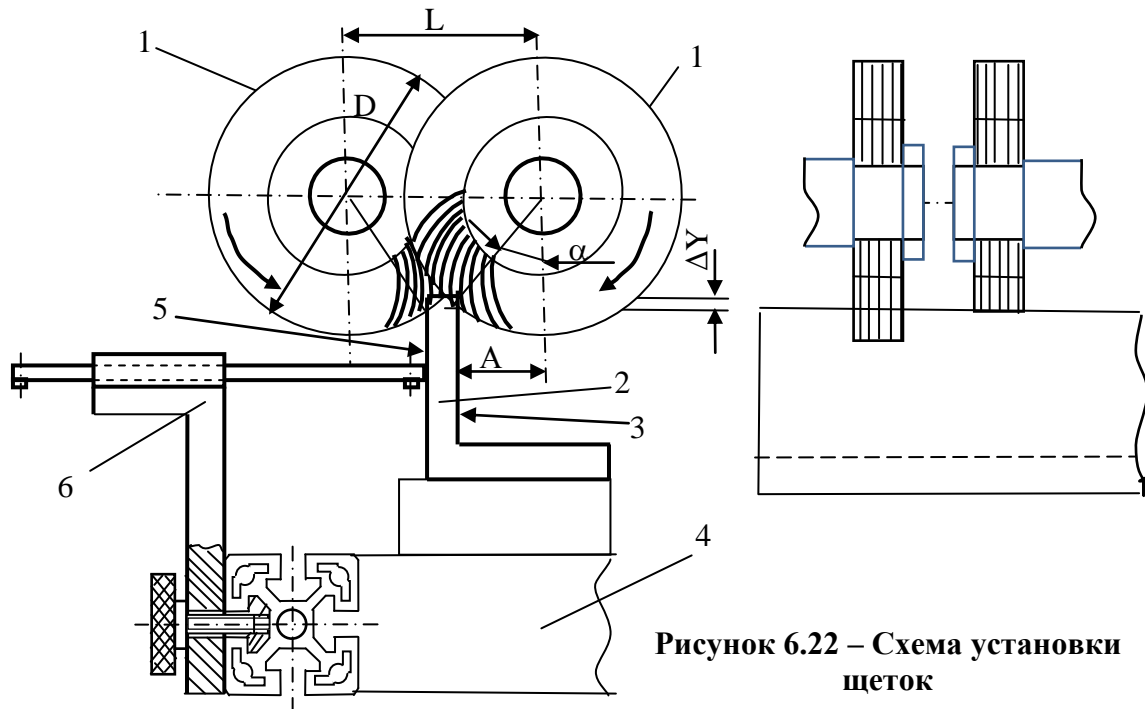


Рисунок 6.22 – Схема установки щеток

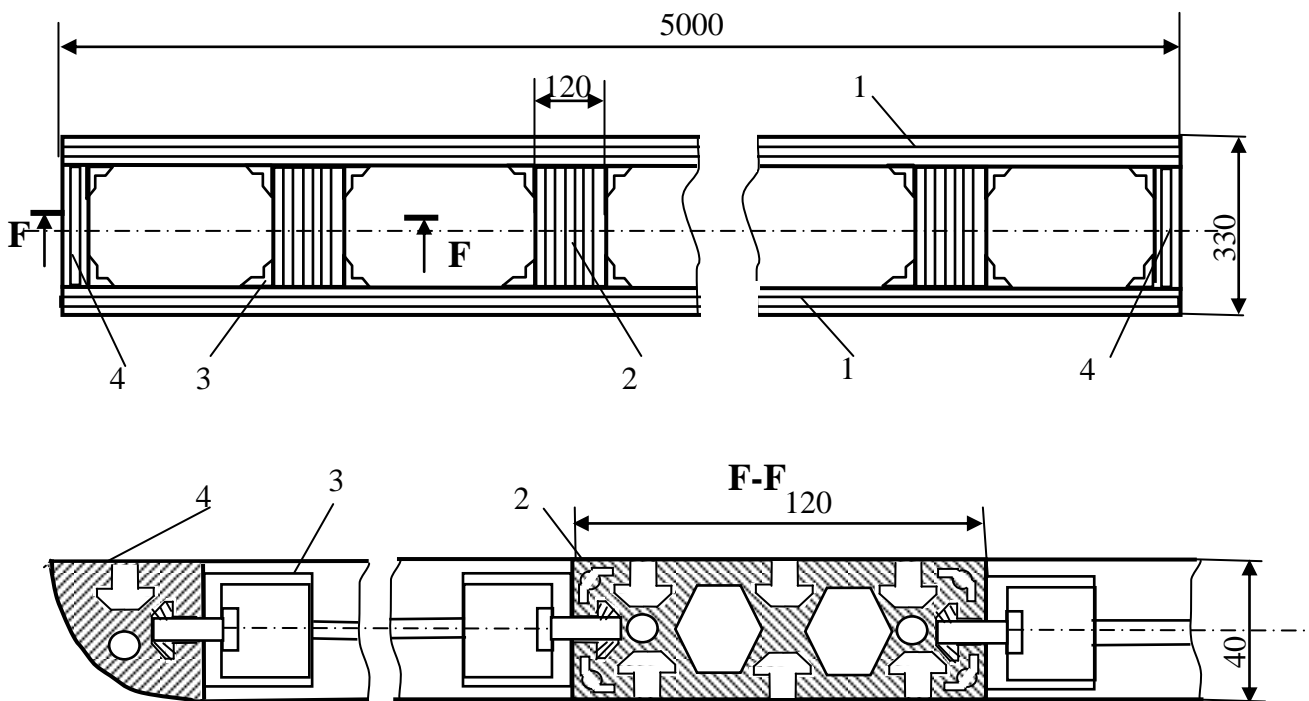


Рисунок 6.23 – Стол

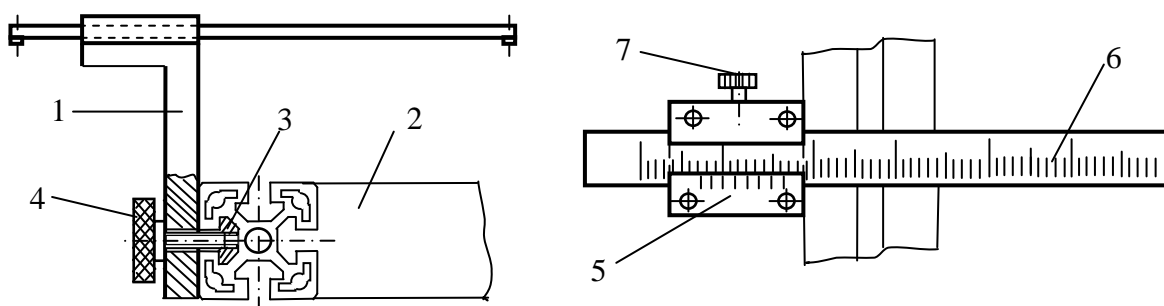
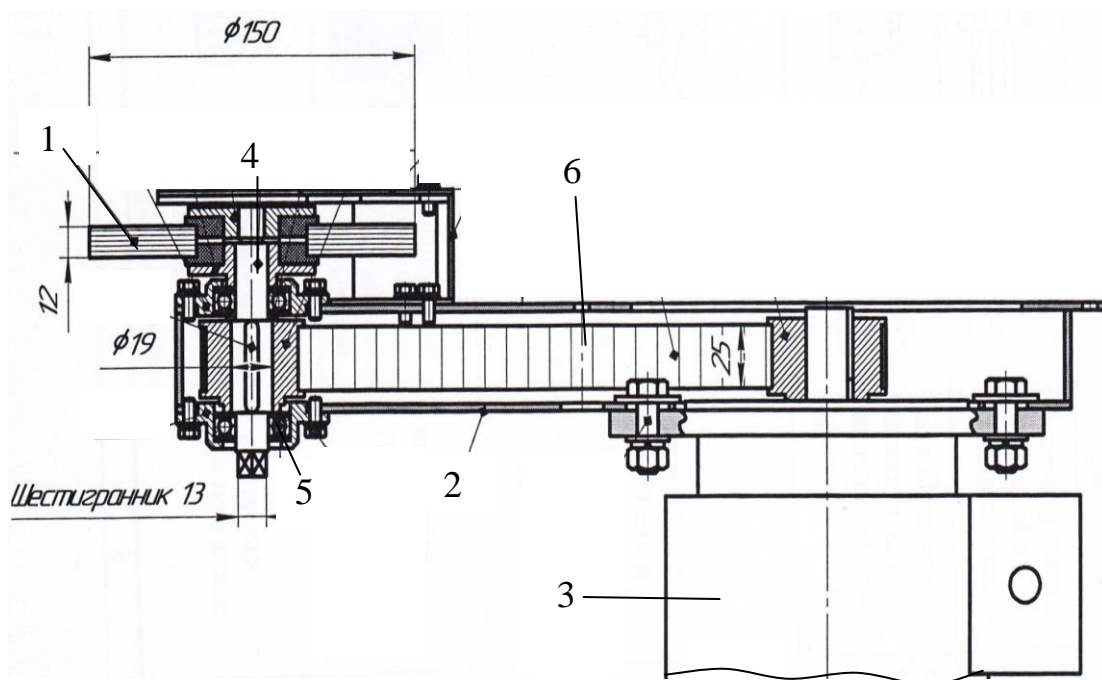


Рисунок 6.24 – Съемный упор для базирования заготовки



**Рисунок 6.25 –  
Привод щетки**

Привод щетки (рисунок 6.25) предназначен для обеспечения вращательного движения обрабатывающего инструмента – полимерно-абразивной щетки 1. Состоит из корпуса 2, на котором установлены фланцевый электродвигатель 3 (АИР71В4) и вал 4 на подшипниках качения 5 (80202). На вал крепится щетка 1. Вращение от электродвигателя 3 передается на вал 4 зубчато-ременной передачей 6 (Т5/675; Z=135).

Рольганг (рисунок 6.26) предназначен для размещения стола и обеспечения его перемещения цепной передачей от мотор-редуктора (DRV-030-/050-400-3,5-0,09-VS2). Состоит из девяти центральных 1 и одной левой 2 стоек, которые соединены между собой стяжками 6, 7, 8. Для размещения и перемещения стола предусмотрены восемь центральных 3, одна левая 4 и одна приводная 5 опоры. Все стойки 1 и 2 установлены на регулируемые опоры 20 (058 M12x85).

Система пылеудаления 7 (см. рисунок 6.20) предназначена для удаления продуктов износа полимерно-абразивных щеток и снятых с обрабатываемой кромки частиц материала детали. Состоит из промышленного пылесоса (Дастпром ПП 201 [215]), шланка, распределителя, закрепленного на портале, и шлангов (Filtero FTT 01 [294]), соединенных с патрубками кожухов щеток.

Средствами измерений и контроля размеров обработанной кромки при настройке установки на обработку одной или двух кромок на деталях являются:

- микроскоп измерительный МПБВ – 1020, МПБ – 3М, МПБ – 3 или МПБ – 2 (лупа Бринелля) [215]. Предел допустимой абсолютной погрешности на диапазоне измерений 0–2,0 мм составляет  $\pm 0,006$  мм;
- эталоны на скругленную кромку по наименьшему и наибольшему предельным размерам.

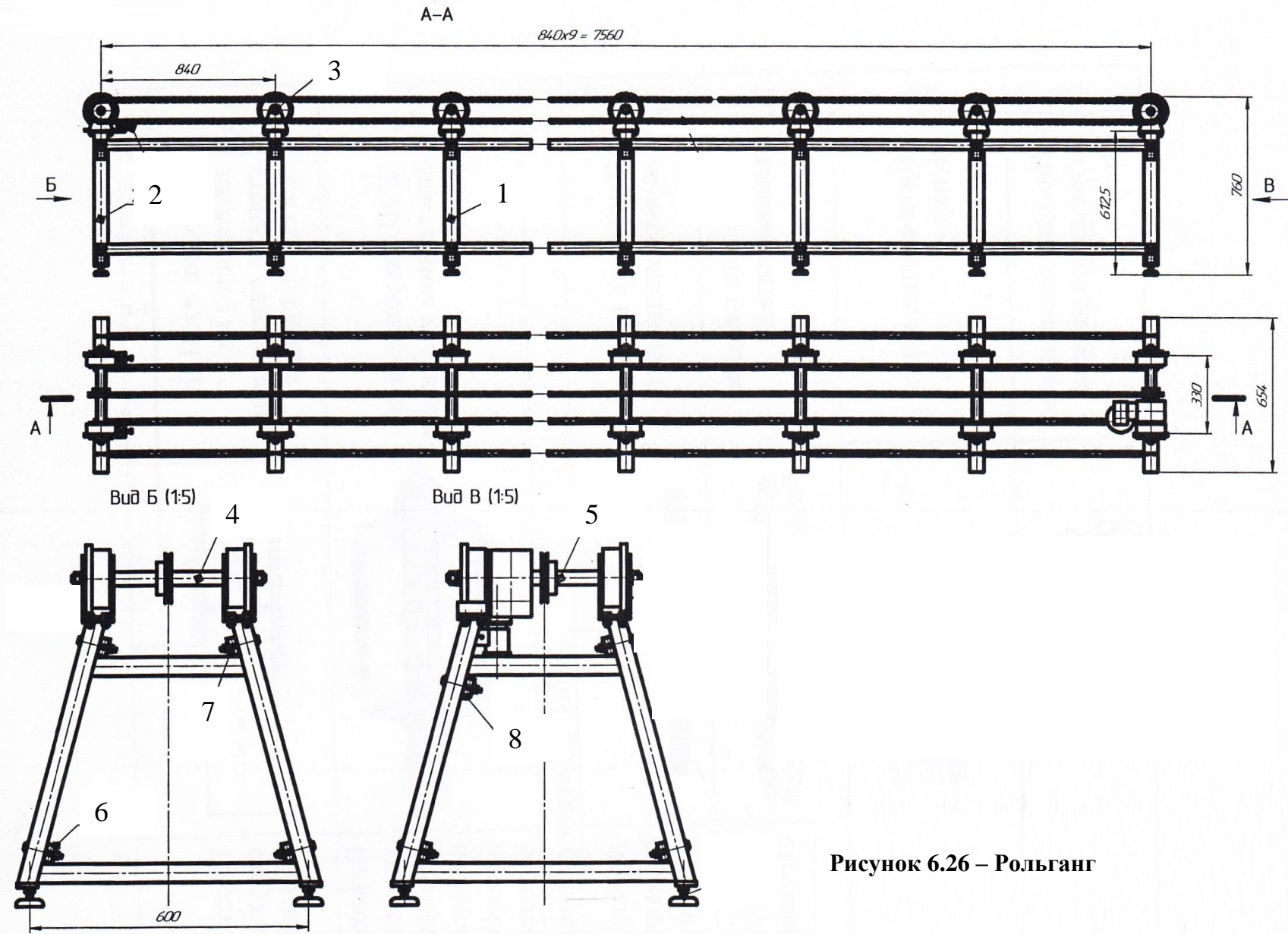


Рисунок 6.26 – Рольганг

## Результаты и выводы по главе 6

1. Роботизация финишной обработки деталей с использованием полимерно-абразивного инструмента является одним из перспективных направлений замены ручного труда на механизированный и автоматизированный. Это подтверждено проведенными исследованиями обработки кромок на робототехническом комплексе (РТК) на базе промышленного робота KUKA KR 210 R2700 EXTRA. При этом в качестве инструмента могут применяться большое разнообразие полимерно-абразивных инструментов: круги, радиальные и торцевые щетки, шлифовальные колпачки и конусы.
2. Установлено, что обработка кромок на РТК с высокими скоростями резания/частотами вращения (скорость до 2000 м/мин при обработке радиальными щетками и частота вращения до 6000 об/мин при обработке торцевыми щетками) идет стабильно при сохранении высокого качества обработанной поверхности при соответствующей балансировке инструмента. Таким образом доказано, что эластичность полимерно-абразивного инструмента является несомненным преимуществом, поскольку, при его использовании, влияние колебательных явлений, возникающих при работе на РТК, на качество обработанных кромок является незначимым, что позволяет избежать целого ряда проблем, возникающих при обработке жестким инструментом.
3. Разработанные эмпирические математические модели производительности процесса (размер кромки) при обработке на РТК, позволяют аналитически определять размер кромки и эффективно управлять режимными параметрами обработки, в том числе при их корректировке в случае воздействия возмущающих факторов.
4. Принятая система определения оптимального положения щетки относительно обрабатываемой поверхности с использованием эмпирического математического моделирования, позволяет обеспечить требуемую точность месторасположения кромки.
5. Анализ технологических возможностей обработки кромок на РТК показал, что большинство сочетаний поверхностей (по наружному и внутреннему радиусам, овальных отверстий в доступных и труднодоступных для обработки местах, прямолинейных кромок в труднодоступных местах) могут быть успешно обработаны с применением полимерно-абразивных инструментов.
6. С целью внедрения разработанных технологий в условиях реального производства, разработана конструкция специального оборудования, позволяющего вести эффективную обработку кромок авиационных длинномерных деталей типа профиль двумя полимерно-абразивными щетками.

## 7 Управление производительностью процесса и качеством изделий при финишной обработке деталей полимерно-абразивными инструментами и технологические рекомендации<sup>1</sup>

### 7.1 Алгоритм проектирования технологической операции финишной обработки полимерно-абразивными инструментами

Универсальный алгоритм проектирования операции финишной обработки деталей полимерно-абразивными инструментами, разработанный в соответствии с принципами, изложенными в п. 2.1, представлен на рисунке 7.1.

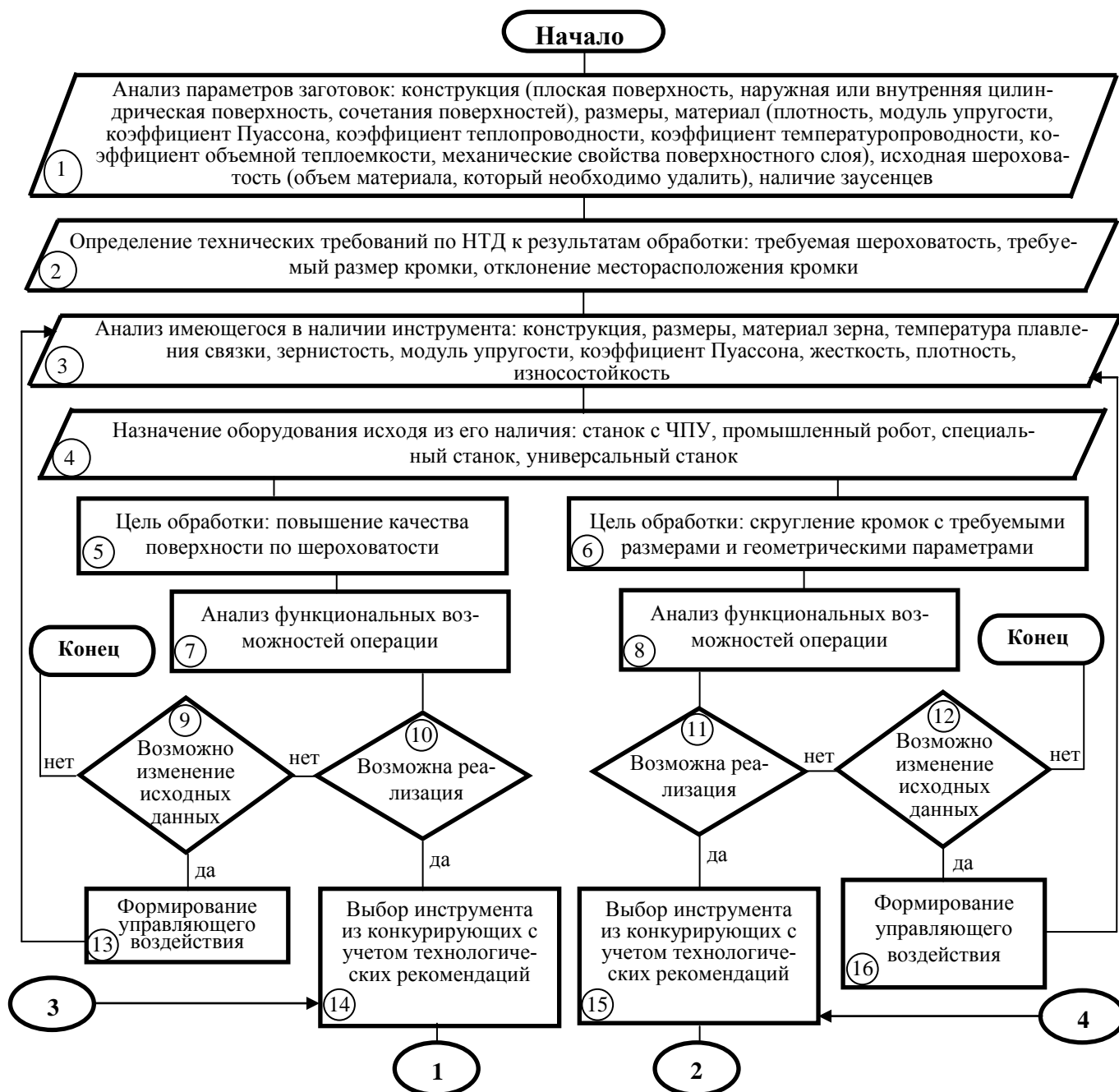


Рисунок 7.1 – Схема алгоритма проектирования операций финишной обработки полимерно-абразивными инструментами

<sup>1</sup> Результаты данных исследований опубликованы автором лично и в соавторстве в работах [68, 180, 181, 186, 282].

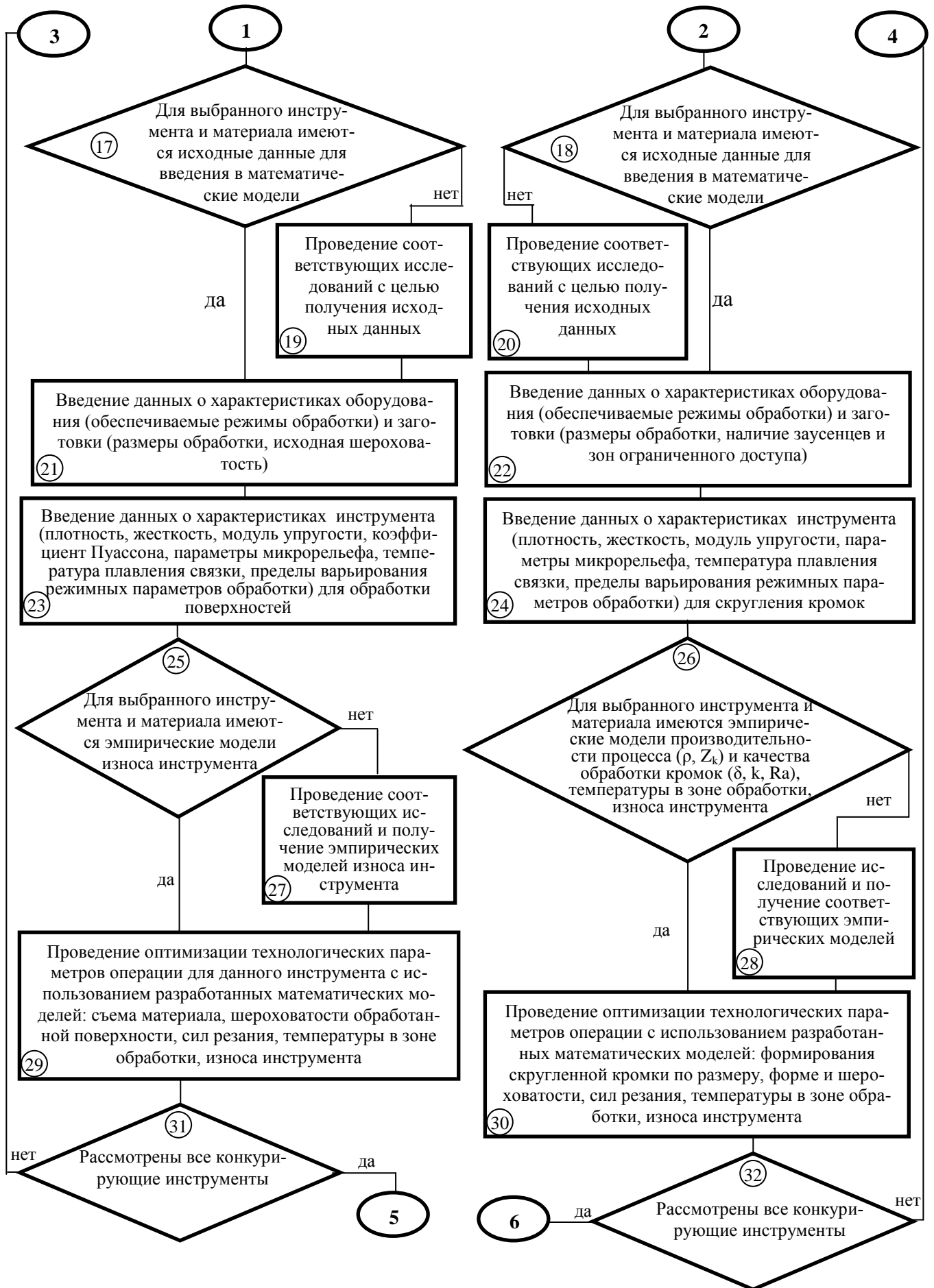
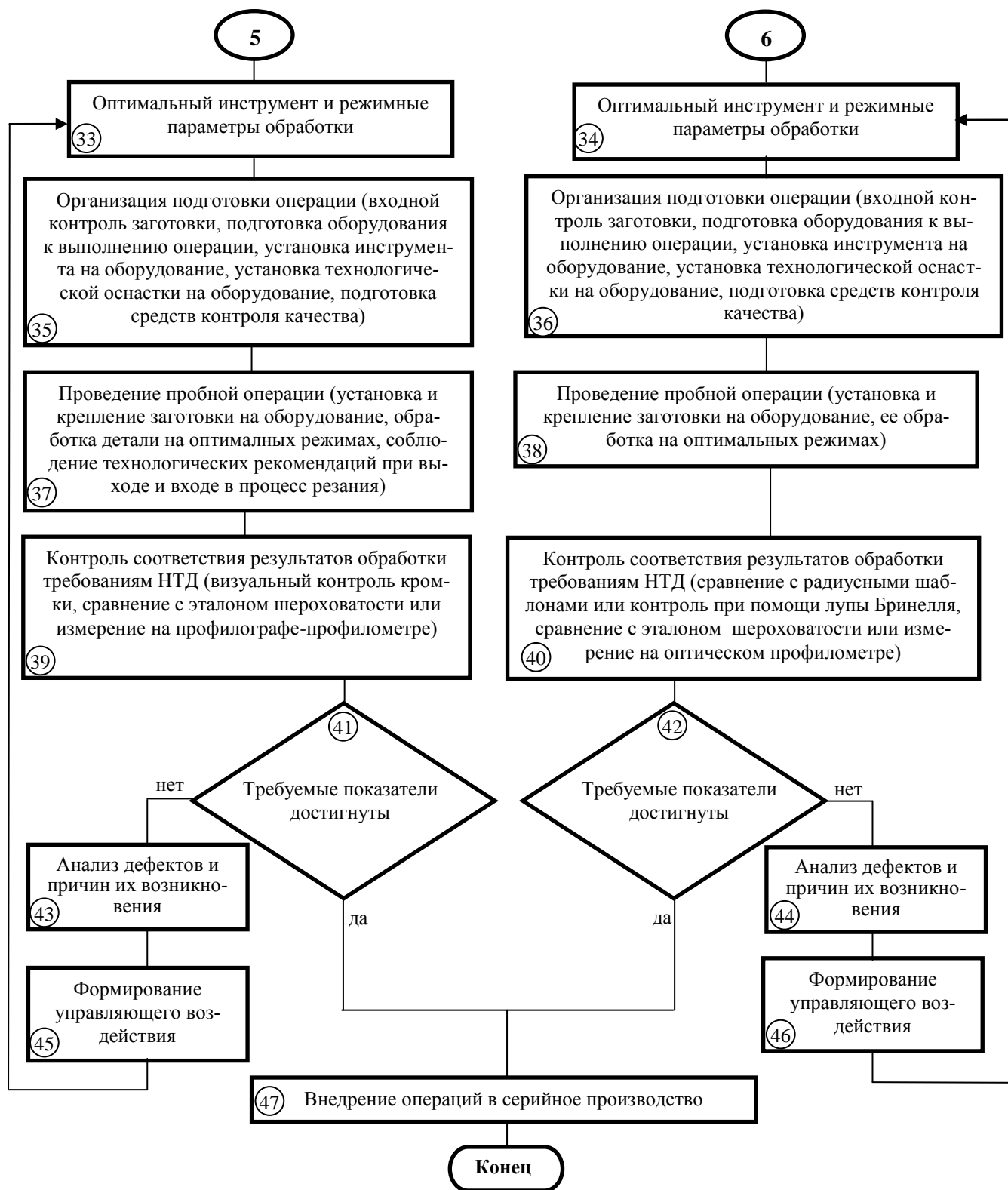


Рисунок 7.1 – Продолжение



**Рисунок 7.1 – Окончание**

Исходными данными для проектирования технологической операции служат:

- 1) параметры заготовки (блок 1) – конструктивные, размерные, физико-механические свойства (плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент теплопроводности, коэффициент температуропроводности, коэффициент объемной теплоемкости, механиче-

ские свойства поверхностного слоя), исходная шероховатость, наличие заусенцев и труднодоступных участков;

2) технические требования на обработанную деталь (блок 2) – требуемая шероховатость, требуемый размер кромки, отклонение месторасположения кромки;

3) имеющийся в наличии инструмент и его свойства (блок 3) – конструкция, размеры, материал зерна, температура плавления связки, зернистость, модуль упругости, коэффициент Пуассона, жесткость, плотность, износостойкость;

4) имеющееся в наличии оборудование (блок 4) – станок с ЧПУ, промышленный робот, специальный станок, универсальный станок.

Целями обработки, рассматриваемыми в настоящей работе, могут являться: повышение качества поверхности (плоской, наружной цилиндрической, внутренней цилиндрической, сочетание поверхностей) по шероховатости (блок 5) или скругление острых кромок (блок 6) с требуемыми размерами и геометрическими параметрами.

Финишная обработка полимерно-абразивными инструментами, как и любой другой вид обработки, обладает определенными ограничениями в функциональных возможностях. Блоки 7 и 8 предусмотрены для проведения анализа функциональных возможностей операций. Если реализация не возможна, информация передается на блоки 9 или 12, где решается вопрос о передаче информации на блоки 13 или 16 для формирования управляющего воздействия (выбор другого инструмента из имеющихся в наличии, свойства которого позволяют выполнить реализацию данной операции, возможно приобретение нового инструмента с необходимыми свойствами, выбор другого оборудования) или об отказе от дальнейшего проектирования операции (полное несоответствие параметров заготовки функциональным возможностям операции, полное отсутствие на предприятии необходимого инструмента и оборудования).

При обработке кромок в случае существенного различия в размерах и формы заусенцев и невозможности выполнить кромку с заданными (хотя и достаточно большими) допусками, выполнение операции необходимо переводить на оборудование с автоматическим регулированием параметра  $\Delta Y$ .

Если функциональные возможности не препятствуют реализации данной операции (блоки 10 и 11), то информация передается в блоки 14 или 15 для дальнейшего проектирования операции. Таким образом, дальнейшее проектирование операции сводится к выбору инструмента и режимных параметров обработки, при которых достигается требуемое качество обработки при наибольшей производительности и наименьшей себестоимости выполнения операции. В блоке 14 (для операции зачистки поверхностей) и блоке 15 (для операции скругления кромок) осуществляется выбор любого инструмента среди конкурирующих с учетом технологических рекомендаций (в том числе приведенных по результатам исследований, описанных в главах 3, 4, 5, 6). Так, например, для обработки плоских легкодоступных поверхностей рекомендовано ис-



пользование наиболее производительных эластичных полимерно-абразивных кругов (см. главу 3), для скругления легкодоступных кромок, в том числе на длинномерных деталях рекомендовано использование полимерно-абразивных радиальных щеток (см. главу 4), для обработки зон ограниченного доступа, сочетаний различных поверхностей и т.д. целесообразно использование торцевых полимерно-абразивных щеток или радиальных инструментов малого диаметра (см. главы 5 и 6).

Для выбора инструмента, который способен обеспечить требуемое качество обработки при наибольшей производительности и наименьшей себестоимости выполнения операции, необходимо для каждого из имеющихся в наличии инструментов определить наименьшую себестоимость выполнения операции данным инструментом и режимные параметры обработки, при которых она достигается. Для этого необходимо использовать разработанные теоретические математические модели:

- для операции обработки поверхностей – съема материала (см. п. 3.3), шероховатости обработанной поверхности (см. п. 3.4), сил резания (см. п. 3.2 и п. 5.2.1), температуры в зоне обработки (см. п. 3.5 и п. 5.2.3);
- для операции скругления кромок – сил резания (см. п. 4.1.2 и п. 5.1.2).

Для того, чтобы воспользоваться предложенными математическими моделями необходимо иметь следующие исходные данные:

- характеристики оборудования (обеспечиваемые режимы обработки);
- характеристики заготовки (для операции зачистки поверхностей – размеры обработки, исходная шероховатость; для операции скругления кромок – размеры обработки, наличие заусенцев и зон ограниченного доступа);
- характеристики инструмента (плотность, жесткость, модуль упругости, коэффициент Пуассона, параметры микрорельефа, температура плавления связки, пределы варьирования режимных параметров обработки);
- экспериментальные поправочные коэффициенты, которые используются в математических моделях и подробно описаны в соответствующих разделах работы.

Если все вышеперечисленные исходные данные имеются (блоки 17 и 18), то осуществляется введение этих данных в разработанные математические модели (блоки 21, 23 и 22, 24) и переход к блокам 25 и 26 соответственно. Так, для исследованных в настоящей работе инструментов и материалов заготовок, исходные данные приведены в главах 3, 4, 5. Если исходных данных не имеется, то необходимо проведение соответствующих исследований по методикам, приведенным в п. 3.1, 4.1.1, 5.1.1.

В настоящей работе, такая информация как износ инструмента при обработке поверхностей, производительность процесса и качество обработки кромок, температура и износ инструмента при обработке кромок получена при помощи экспериментальных исследований, описан-

ных в соответствующих разделах работы. Если для выбранного инструмента и материала заготовки проведены соответствующие исследования (блоки 25 и 26), то осуществляется расчет вышеописанных показателей по имеющимся эмпирическим моделям и переход к блокам 29 (при обработке поверхностей) и 30 (при скруглении кромок) соответственно. Если таких исследований нет, то необходимо проведение соответствующих исследований (блоки 27 и 28) и построение эмпирических моделей в соответствии с методиками, изложенными в соответствующих разделах работы (см. главы 3, 4, 5).

Таким образом, на основе разработанных теоретических и эмпирических моделей проводится оптимизация технологических параметров для выбранного инструмента (блоки 29 и 30 соответственно для обработки поверхностей и скругления кромок).

Для оптимизации рассматриваемых технологических операций назначаются технологические ограничения: температура плавления связки инструмента, достижимая шероховатость  $Ra$  поверхности детали, обеспечиваемая данным инструментом, достижимый размер кромки. После перебора всех сочетаний варьируемых режимных параметров, определяется сочетание режимов (скорость резания  $V$  (частота вращения  $n$  для торцевых инструментов), деформация инструмента ( $\Delta Y$ ), подача  $S$ , углы положения инструмента относительно обрабатываемой кромки ( $\alpha$ ,  $\beta$ ), смещение  $A$  относительно обрабатываемой кромки для торцевых инструментов), обеспечивающее выполнение рассматриваемых технологических операций с наибольшей производительностью и наименьшей себестоимостью при соблюдении всех необходимых ограничений.

Оптимизация осуществляется при помощи разработанных программных модулей, подробное описание, алгоритмы и интерфейсные окна которых приведены в п. 7.2–7.3 и 7.5–7.6.

Если рассмотрены не все конкурирующие инструменты, которые можно применить для выполнения исследуемой операции, то необходимо осуществить выбор следующего инструмента (возврат к блокам 14 или 15).

После того, как все конкурирующие инструменты рассмотрены и оптимизация технологических параметров для них проведена, осуществляется выбор оптимального инструмента среди конкурирующих и определение оптимальных режимов обработки  $V$  (или  $n$  для торцевых щеток)  $\Delta Y$ ,  $S$  (блоки 33 или 34). Основным критерием выбора оптимального инструмента является его наибольшая экономическая эффективность (минимальная себестоимость выполнения операции).

Следует отметить, что получение стабильного качества обработки и получение достоверных результатов по предложенным теоретическим и эмпирическим математическим моделям при проектировании операции в целом требуется проведение ряда организационно-технических мероприятий, а именно:

*1. Организация подготовки операции (блоки 35 и 36), которая включает в себя:*

- организацию технологических мероприятий статистического контроля качества заготовок, поступающих на выполнение рассматриваемой операции, по перечисленным характеристикам (см. блок 1). При оценке состояния обрабатываемой заготовки производится измерение размеров, оценивается исходная шероховатость поверхности по параметрам  $Ra$  ( $Rz$ ), фиксируются предел прочности  $\sigma_b$ , предел текучести  $\sigma_T$ , плотность  $\gamma_d$ , модуль упругости  $E$ , коэффициент Пуассона, особые свойства тонкого поверхностного слоя обрабатываемой поверхности и его роли в процессе взаимодействия абразивного зерна (см. уравнения (3.44), (3.46)).
- подготовку оборудования к выполнению операции (запуск, анализ 3D-модели детали, разработку управляющих программ и т.д.), установку инструмента и технологической оснастки на оборудование;
- подготовку средств контроля качества обработки.

2. *Проведение пробной операции (блоки 37 и 38), которая подразумевает:*

- обработку детали оптимальным инструментом на оптимальных режимах с соблюдением всех технологических рекомендаций. Такими технологическими рекомендациями, например, могут быть: при обработке поверхностей – соблюдение технологии входа и выхода в процесс резания (рассмотрена в п. 7.4); при обработке поверхностей и скруглении кромок: соблюдение рекомендаций по периодическому контролю износа и своевременной замене критически изношенного инструмента. Критический износ устанавливается опытным путем и зависит от вида инструмента и условий производства;
- проведение периодической корректировки натяга (деформации)  $\Delta Y$  в связи с износом инструмента. Параметром, по которому необходимо оценивать состояние изношенности инструмента, является время  $T_{изн}$ , в течение которого натяг  $\Delta Y$  уменьшился на допустимую величину износа  $l_{изн}$ . Подробно этот вопрос рассмотрен: для зачистки поверхностей кругами – в п. 3.8, для скругления кромок радиальными щетками – в п. 4.5, для скругления кромок торцевыми щетками – в п. 5.1.6.

3. *Организация контроля соответствия результатов обработки полимерно-абразивным инструментом требованиям НТД.*

При анализе требований НТД следует обратить внимание на допустимые колебания шероховатости, размеров кромок, точности их формы и месторасположения. При обработке поверхностей, высоту неровностей, подлежащую удалению, рекомендуется назначать согласно методике, описанной в п. 7.4.

Контроль соответствия результатов обработки требованиям НТД может осуществляться:

- при обработке поверхностей (блок 39): визуальный контроль наличия заваленных кромок, сравнение с эталоном шероховатости или измерение с помощью профилометра;
- при обработке кромок (блок 40): контроль по радиусным шаблонам или контроль при помощи лупы Бринелля, включая контроль стабильности обработки кромок на протяженных и

труднодоступных участках, а также измерение шероховатости при помощи эталонов шероховатости и лупы.

Если требуемые НТД показатели качества обработки достигнуты (блоки 41 и 42), то следует констатировать, что возможно внедрение рассматриваемых операций в серийное производство (блок 47).

Если требуемые НТД показатели качества обработки не достигнуты, то необходимо осуществить анализ дефектов и причин их возникновения (блоки 43 и 44).

Причины возникновения дефектов могут быть следующими:

- заготовка представлена с исходными показателями по входным параметрам, отличающимися (в связи с их стохастическим характером) от показателей, введенных (номинальных (средних) значений) в рассматриваемую систему управления, в том числе в случае существенного различия в размерах и форме заусенцев;
- взаимное расположение поверхностей в заготовке не позволяет полностью реализовать финишную операцию полимерно-абразивными инструментами на всех поверхностях, отдельные участки могут быть с отклонениями от требуемых параметров качества;
- инструмент существенно отличается (и не мог быть обнаружен при выполнении контроля по блокам 35 и 36) по своим эксплуатационным показателям от исследованного такой же марки и введенного в систему управления.

Разработанная в настоящей работе система управления позволяет минимизировать влияние приведенных выше причин путем:

- 1) проведения дополнительных экспериментальных исследований по фактическим показателям заготовки и имеющегося инструмента;
- 2) введения дополнительной операции по обработке труднодоступного участка со сменой инструмента, которым такой участок может быть обработан;
- 3) перевод на оборудование с автоматическим регулированием параметра  $\Delta Y$  при обработке кромок в случае существенного различия в размерах и форме заусенцев и невозможности выполнить кромку с заданными (хотя и достаточно большими) допусками;
- 4) возвращения к блокам 33 и 34 и корректировки полученных режимов обработки  $V$  (или  $n$  для торцевых щеток),  $\Delta Y$  и  $S$ . Корректировка может проводиться за счет любого из этих параметров. Например, если при обработке поверхности полимерно-абразивными кругами обнаружены не полностью удаленные исходные микронеровности до требуемого уровня, корректировку можно осуществить за счет изменения подачи  $S$ . Для этого из уравнения относительного съема материала (А.3) (см. приложение А) определяется подача  $S$ , при которой будет обеспечен требуемый съем материала  $Q$ :

$$S_{1,2} = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 - 4a_3 \cdot B}}{2a_3},$$

где  $A = a_6 \cdot a_8 \cdot \Delta Y + a_9 \cdot V + a_{10} \cdot \Delta Y \cdot V$ ;  $B = a_1 \cdot \Delta Y^2 + a_2 \cdot V^2 + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot V + a_7 \cdot \Delta Y \cdot V + a_{11} - Q$ .

Из этого же уравнения (А.3) можно найти значения скорости резания  $V$  или деформации инструмента  $\Delta Y$ , при которых будет обеспечен требуемый съём материала  $Q$ .

Аналогичная корректировка может быть выполнена:

- при обработке плоских поверхностей эластичными полимерно–абразивными кругами – по уравнениям (А.4–А.5) (см. приложение А);
- при обработке плоских поверхностей торцевыми полимерно–абразивными щетками – по уравнениям (5.79–5.81) (см. главу 5);
- при обработке кромок эластичными полимерно–абразивными кругами – по уравнениям (4.37), (4.39), (4.40) (см. главу 4);
- при обработке кромок торцевыми полимерно–абразивными щетками – по уравнениям (5.57–5.58) (см. главу 5).

Таким образом, разработанная система оптимального управления проектированием операций финишной обработки деталей полимерно-абразивными инструментами, позволяет назначать наиболее эффективные инструменты и рациональные режимные параметры обработки, а, следовательно, обеспечить требования НТД по качеству обработки, стабильность обработки при наибольшей производительности процесса и наименьшей себестоимости выполнения операции.

Для оптимизации режимных параметров при обработке поверхностей и скругления кромок деталей из материалов, рассмотренных в настоящей работе, при помощи исследованных полимерно-абразивных инструментов, разработаны программные модули, алгоритм реализации и интерфейсные окна которых приведены в п. 7.2–7.3 и 7.5–7.6.

## **7.2 Управляющая подсистема «Оптимизация процесса зачистки поверхностей полимерно-абразивными инструментами»**

Оптимизация процесса обработки деталей полимерно-абразивным инструментом заключается в выборе экономически рациональных инструмента и режимов обработки: деформации инструмента, скорости резания, продольной подачи. Подсистема оптимизации может быть разработана на основе математических моделей:

- производительности процесса обработки,
- формирования поверхностного слоя по шероховатости
- износа инструмента,
- температуры в зоне резания.
- силы резания

Структура подсистемы оптимизации при заданном инструменте представлена на рисунке 7.2.

Принимая во внимание опыт авторов [57, 58, 262] в области оптимизации процессов обработки абразивными инструментами, в качестве критерия оптимизации целесообразно принять целевую экономическую функцию (далее – ЦЭФ), которая рассчитывается по приведенной ниже программе для определенного инструмента. ЦЭФ предназначена для оценки себестоимости всех вариантов процесса и выбора режимов обработки с наименьшим ее значением. Критерием выбора оптимального из рассматриваемых инструментов является минимальное значение ЦЭФ.



Рисунок 7.2 – Структура подсистемы оптимизации процесса зачистки поверхностей

$$ЦЭФ = T_{зач} \cdot (C_T + Z_{эл}) + T_B \cdot C_T + C. \quad (7.1)$$

В составе ЦЭФ имеются целевые функции (ЦФ):

- основного времени обработки  $T_{зач}$ ;
- затрат на расход электроэнергии в единицу времени работы  $Z_{эл}$ ;
- стоимости полимерно-абразивного инструмента на выполнение операции  $C$ .

Ограничительными функциями (ОФ) в рамках ЦЭФ являются зависимости достижимой шероховатости – (А.5) и температуры в зоне обработки (А.6) (см. приложение А) для случая обработки плоских поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами.

В состав ЦЭФ также входят:

1. Измеряемые и регулируемые в процессе выполнения операции входные переменные. Для целевой функции (ЦФ) основного времени обработки  $T_{зач}$  такими переменными являются: скорость резания  $V$ , деформация инструмента  $\Delta Y$ , продольная подача  $S$ .

2. Измеряемые и нерегулируемые в процессе выполнения операции входные переменные:

- для (ЦФ) основного времени обработки  $T_{зач}$  – это заданная по чертежу шероховатость обработанной поверхности ( $Ra^K$ ); параметры микрорельефа полимерно-абразивного инструмента ( $\sigma_1$  – среднее квадратичное отклонение профиля,  $m_1$  – число максимумов,  $n(0)_1$  – число нулей (пересечений со средней линией)); физико-механические свойства обрабатываемого материала ( $K$  – предел текучести обрабатываемого материала на сдвиг,  $\sigma_2$  – среднее квадратичное отклонение профиля,  $m_2$  – число максимумов,  $n(0)_2$  – числа нулей (пересечений со средней линией);  $\mu_t$  – коэффициент пластического трения); показатели качества исходного состояния обрабатываемой поверхности ( $Ra^0$ ); размеры обрабатываемой поверхности ( $l, B$  – длина и ширина обрабатываемой поверхности); параметры полимерно-абразивного инструмента ( $C_r$  – жесткость,  $B_k$  – ширина инструмента,  $r_k$  – радиус втулки инструмента,  $D_k$  – диаметр инструмента,  $\rho$  – плотность материала инструмента);
- для ЦФ затрат на расход электроэнергии в единицу времени работы ( $З_{эл}$ ) – это требуемая мощность привода ( $N_{эл}$ ) и стоимость одного кВт часа ( $C_{эл}$ );
- для ЦФ стоимости полимерно-абразивного инструмента на выполнение операции ( $C$ ) – это стоимость полимерно-абразивного инструмента ( $C_{кр}$ ), размеры обрабатываемой поверхности ( $l, B$ );
- для ЦЭФ в целом – это тарифная ставка рабочего ( $C_T$ ), вспомогательное время операции ( $T_\theta$ ).

3. Выходные параметры. Для ЦЭФ – себестоимость операции обработки полимерно-абразивным инструментом.

### **Основное время обработки**

Для выполнения операции зачистки поверхности необходимо исходную шероховатость  $Ra^0$  довести до требуемой по чертежу шероховатости  $Ra^K$ . При этом, объем материала, который необходимо удалить с микронеровностей на единице площади по данным работы [128], составит:

$$Q_\Phi = 3 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot (Ra^0 - Ra^K),$$

где  $Ra^0$  – исходная шероховатость;  $Ra^K$  – требуемая шероховатость.

Время для выполнения операции зачистки определится по формуле:

$$T_{зач} = T_1 \cdot N_{прох}, \quad (7.2)$$

где  $N_{прох}$  – количество проходов:

$$N_{прох} = K_{ш} \cdot \frac{Q_\Phi \cdot 1000}{q \cdot L \cdot T_1} = K_{ш} \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot (Ra^0 - Ra^K) \cdot 1000}{q \cdot L \cdot T_1},$$

где  $K_{ш}$  – коэффициент, учитывающий ширину обрабатываемой поверхности,  $K_{ш} = B/B_k$  ( $B$  – ширина обрабатываемой поверхности,  $B_k$  – ширина полимерно-абразивного инструмента). При

$B \leq B_k$  принимается  $K_{ин} = 1$ , при  $B > B_k$ , если  $K_{ин}$  окажется дробным числом, то оно округляется до целого числа в большую сторону;

$q$  – удельный съем материала, см. зависимость (А.4) приложения А;  $T_1$  – время обработки поверхности за один проход, мин;

$$T_1 = \frac{l + \Delta l}{S},$$

где  $l$  – длина обрабатываемой поверхности, мм;  $\Delta l$  – дополнительное перемещение на вход и выход инструмента при обработке, мм:

$$\Delta l = 2\sqrt{2 \cdot \Delta Y \cdot R_K - \Delta Y^2},$$

$L$  – путь перемещения поверхности инструмента относительно детали в м:

$$L = \frac{(\pi \cdot D_k \cdot n - S) \cdot T}{1000},$$

где  $T$  – время обработки, мин:  $T = \frac{l}{S}$ ;

$R_K$  – радиус инструмента, мм;  $n$  – частота вращения инструмента, об/мин;  $S$  – продольная подача, мм/мин;  $\Delta Y$  – деформация инструмента, мм.

#### ***Затраты на электроэнергию***

Для выполнения операции зачистки поверхности затраты на расход электроэнергии в единицу времени работы зависят от требуемой мощности на процесс резания и стоимости одного кВт/ч.

$$З_{ЭЛ} = N_{ЭЛ} \cdot C_{ЭЛ}, \quad (7.3)$$

где  $C_{ЭЛ}$  – стоимость одного кВт/ч, руб;  $N_{ЭЛ}$  – требуемая мощность привода, в кВт:

$$N_{ЭЛ} = 60 \cdot P_z \cdot \pi \cdot D_k \cdot n / 10^6.$$

Здесь  $P_z$  – тангенциальная сила резания, Н (см. п. 3.2);  $D_k$  – диаметр инструмента, мм;  $n$  – частота вращения инструмента, об/мин.

#### ***Стоимость полимерно-абразивного инструмента на выполнение операции***

В процессе зачистки износ инструмента зависит от его интенсивности и продолжительности обработки. Стоимость изношенного инструмента на выполнение операции зачистки определяется по формуле:

$$C = \frac{4 \cdot C_{кр}}{\pi \cdot \{D_k^2 - [K_{изн} \cdot (D_k - d_k)]^2\}} \cdot I \cdot T, \quad (7.4)$$

где  $C_{кр}$  – стоимость инструмента, руб;  $d_k$  – диаметр втулки инструмента, мм;  $K_{изн}$  – коэффициент допустимого износа инструмента (рекомендуется  $K_{изн} = 0,5$ );  $I$  – интенсивность износа инструмента, которая рассчитывается для эластичных полимерно-абразивных кругов исходя из (3.76) и выражается в мм/мин.

Максимально допустимый износ полимерно-абразивного инструмента принят следующим:



- для полимерно-абразивных кругов: 50 – 70% от длины деформируемой части круга  $d = (R_k - r_k)$ ;
- для торцевых полимерно-абразивных щеток: не более 50% от длины ворсины  $l_v$ .

После достижения данных показателей существенно уменьшается эластичность инструмента и он подлежит замене.

Структура подсистемы оптимизации процесса зачистки поверхностей торцевыми полимерно-абразивными щетками (исследования которых рассмотрены в п. 5.2 главы 5) аналогична представленной структуре подсистемы оптимизации процесса зачистки поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами.

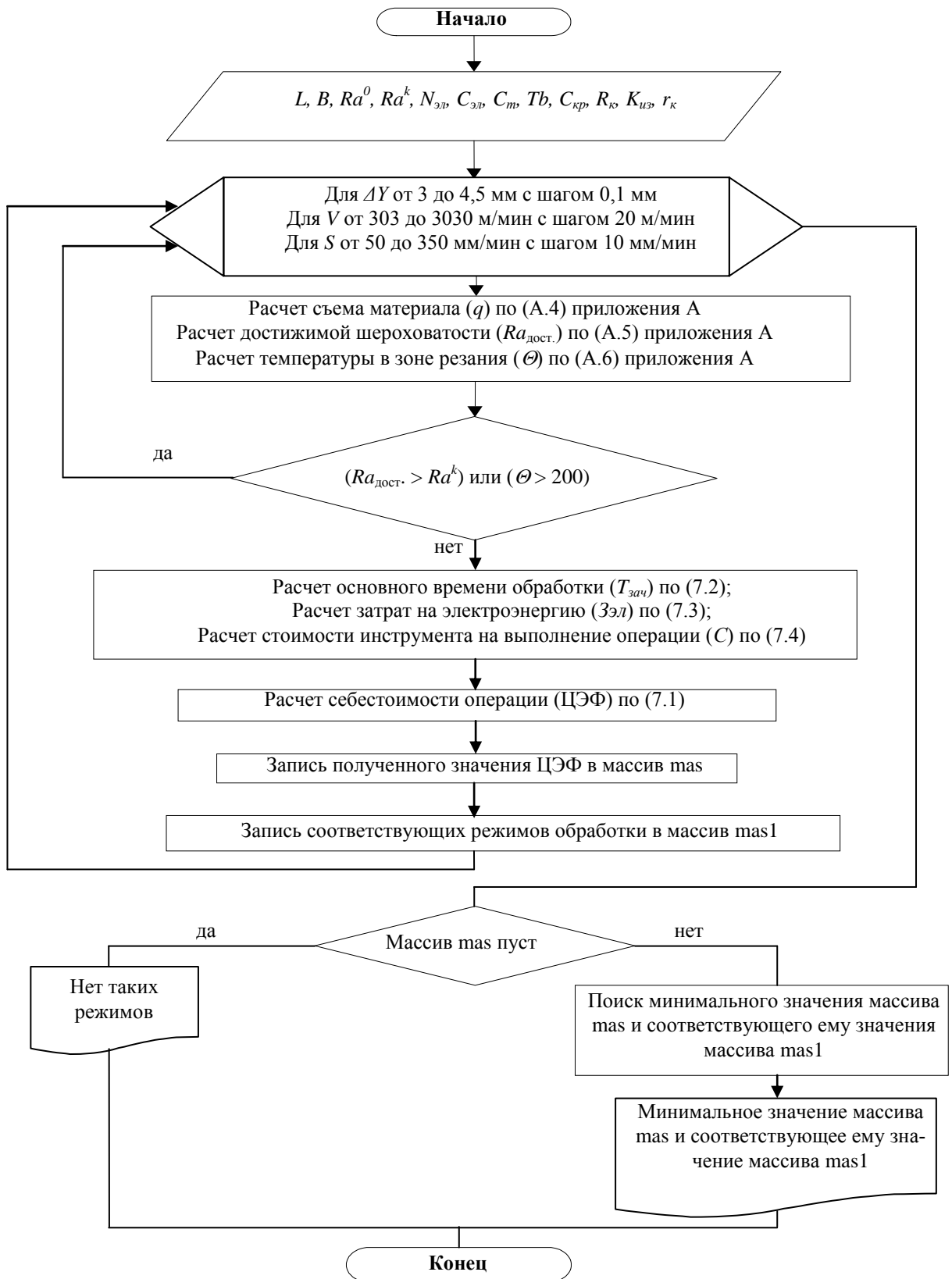
### **7.3 Программа оптимизации процесса зачистки поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами**

Для проектирования технологической операции в соответствии с принципами, изложенными в п. 2.1, 7.1 и 7.2, разработан модуль программного обеспечения, позволяющий автоматизировать основные расчеты по оптимизации процесса обработки поверхностей полимерно-абразивными инструментами и прогнозированию основных результатов данной обработки. Программный модуль разработан с помощью Borland C++ Builder 6.

Данная программа составлена для каждого из предполагаемых к применению инструментов. В качестве примера такие программы разработаны для трех исследованных кругов: CF-FB 0,5AFIN, FS-WL 2SCRS и FS-WL 6SFIN. Исследованные в работе круги FS-WL 8SMED, DB-WL 8SMED, DB-WL 7SFIN не использованы в процессе оптимизации обработки в связи с тем, что они обладают существенными недостатками при обработке алюминиевого сплава (высокая жесткость инструмента, повышенный эффект засаливания).

В качестве примера, алгоритм программы поиска оптимальных режимов для инструмента CF-FB 0,5AFIN приведен на рисунке 7.3. Представленная программа позволяет определять оптимальные режимы обработки, исходя из размеров обрабатываемой поверхности, а также исходной шероховатости и шероховатости, требуемой по чертежу. Окно этой программы показано на рисунке 7.4, а исходный код приведен в п. Г.1 приложения Г.

Представленная программа позволяет выбирать оптимальный инструмент и определять оптимальные режимные параметры обработки полимерно-абразивными инструментами.



**Рисунок 7.3 – Алгоритм программного модуля поиска оптимальных технологических параметров зачистки поверхности кругом CF-FB 0,5AFIN**

**Рисунок 7.4 – Окно программы расчета оптимального варианта процесса зачистки поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами**

## 7.4 Реализация полученных результатов при зачистке поверхностей деталей

По программе, рассмотренной в п. 7.3, в качестве примера рассчитаны оптимальные параметры обработки для материала В95пчТ2, которые являются рекомендуемыми при внедрении обработки полимерно-абразивными инструментами на производстве.

В таблице 7.1 в качестве примера приведены эти рекомендации. В зависимости от исходной шероховатости обрабатываемой поверхности и требуемой по чертежу шероховатости обработанной поверхности рекомендуются марки инструментов и оптимальные режимы обработки (скорость резания, деформация инструмента и продольная подача).

Высота неровностей, подлежащая удалению  $\Delta$ , определится по формуле:

$$\Delta = 4 \cdot (Ra^0 - Ra^K),$$

где  $Ra^0$  – исходная шероховатость;  $Ra^K$  – требуемая шероховатость.

Учитывая незначительную величину  $\Delta$ , а также возможное наличие участков поверхности, которые не требуют обработки, припуск целесообразно назначать за счет допуска на изготовление размера детали. Например, по ГОСТ 30893.1–2002 – m при обработке детали толщиной 6–30 мм допуск на изготовление равен  $\pm 0,2$  мм. При  $Ra^0$  10 и  $Ra^K$  3,2 высота неровностей, подлежащая удалению, составит  $\Delta = 27,2$  мкм. Предельные отклонения в данном случае необходимо назначить следующими:  $\begin{matrix} +0,200 \\ -0,173 \end{matrix}$  мм.

Таблица 7.1 – Рекомендуемые режимы резания при зачистке эластичными полимерно-абразивными кругами образца из алюминиевого сплава В95пчТ2 длиной 100 мм, шириной 30 мм

$Ra^o$ (исход.), мкм	$Ra^k$ (треб.), мкм	Рекомендуемый инструмент	$V$ , м/мин	$\Delta Y$ , мм	$S$ , мм/мин
5	2,0	FS-WL 2SCRS	1192	1,5	200
	2,5	FS-WL 2SCRS	1192	1,5	190
	3,5	FS-WL 2SCRS	1235	1,5	310
8	1,5	FS-WL 6SFIN	499	1	220
	2,4	FS-WL 2SCRS	1192	1,5	180
	6,3	FS-WL 2SCRS	1365	1,5	330
10	1	CF-FB 0,5AFIN	566	3,1	270
	2,5	FS-WL 2SCRS	1192	1,5	190
	6,3	FS-WL 2SCRS	1365	1,5	330

При обработке поверхности полимерно-абразивными инструментами при его входе и выходе образуются заваленные кромки, которые могут превышать допуск на соответствующий размер, поэтому в данном случае необходимо постепенно изменять деформацию инструмента  $\Delta Y$ . При входе постепенно увеличивать с  $\Delta Y = 0$  до необходимой, при выходе – постепенно уменьшать до  $\Delta Y = 0$ . Процесс входа и выхода необходимо производить на длине  $L_K$  (рисунок 7.5).

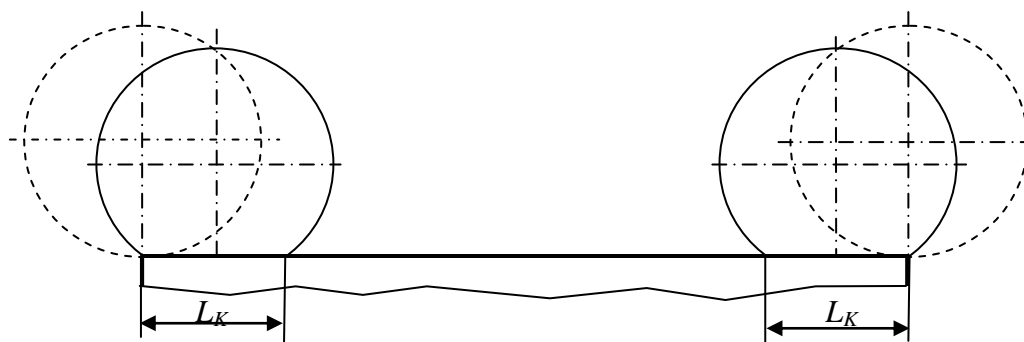


Рисунок 7.5 – Схема ввода и вывода инструмента

При этом  $L_K$  для случая контакта круга с плоской поверхностью определяется по формуле (3.34). Оставшиеся в зоне входа и выхода инструмента не полностью обработанные части поверхности рекомендуется, обрабатывать отдельными проходами вдоль кромки.

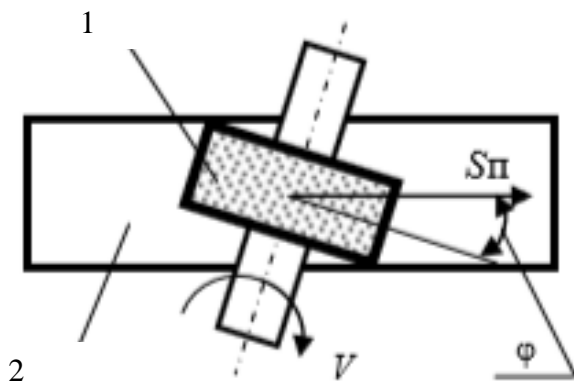
Согласно [214], при многопроходном плоском шлифовании поверхностей, ширина которых больше ширины инструмента обработка производится с поперечной подачей:

$$S_{\text{поп}} = (0,2-0,3) \cdot B_k,$$

где  $B_k$  – ширина инструмента. Эти рекомендации могут быть использованы и при зачистке поверхностей.

Для *повышения качества* обработки плоских поверхностей по шероховатости рекомендуются следующие способы обработки полимерно-абразивными инструментами:

1. Создание дополнительного осциллирующего движения полимерно-абразивному инструменту или детали. Это изменяет характер микрорельефа обработанной поверхности. Вместо прямых линий на поверхности образуются волнистые, пересекающиеся друг с другом неровности.

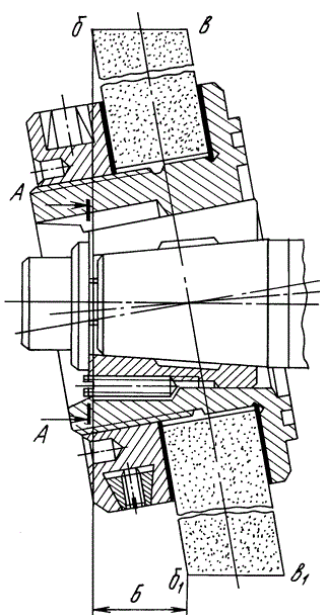


**Рисунок 7.6 – Схема обработки плоскости с поворотом инструмента [243]**

0,93 мкм, а с осцилляцией стала  $Ra_{\text{прод.}} = 0,4-0,5$  мкм.

2. Поворот оси полимерно-абразивного инструмента относительно продольной подачи.

Вместо прямых линий на поверхности образуются пересекающиеся друг с другом неровности.



**Рисунок 7.7 – Устройство [166] для крепления инструмента**

Так, в работе [58] рассмотрено влияние осцилляции на величину параметра шероховатости  $Ra$  при обработке лепестковыми инструментами КЛО 350x100x40 из шкурки 51С16 У2РБ на образцах из высокопрочных алюминиевых сплавов В95пчТ2. Было использовано приспособление, позволяющее создавать частоту осцилляции 4,2; 6,13 и 7,17 Гц с амплитудой 1; 1,5; 2 и 2,5 мм. Установлено, что поперечная шероховатость для В95Т без осцилляции была  $Ra_{\text{поп.}} = 2,71$  мкм, а с осцилляцией стала  $Ra_{\text{поп.}} = 0,8-1,15$  мкм, продольная без осцилляции была  $Ra_{\text{прод.}} =$

В работе [243] исследования проводились по схеме обработки, приведенной на рисунке 7.6, предполагающей наличие вращательного движения дискового инструмента 1, поступательного перемещения образца 2, а также задание некоторого угла  $\varphi$  между вектором подачи обрабатываемой поверхности и плоскостью вращения инструмента.

Установлено, что на шероховатость плоских поверхностей образцов из сплава АМг5 и стали 12Х18Н10Т существенное влияние оказывает величина угла разворота дискового полимерно-абразивного инструмента  $\varphi$  относительно направления подачи заго-

товки. При этом способе можно обеспечить получение значений параметра  $Ra$  шероховатости поверхности в достаточно широком диапазоне значений (0,23...2,33 мкм).

3. Установка инструмента под углом к плоскости, перпендикулярной оси вращения инструмента. Вместо прямых линий на поверхности образуются пересекающиеся друг с другом неровности.

За пол-оборота шпинделя и шлифовального инструмента зона резания  $b-v$  (рисунок 7.7), находящаяся на его периферии, переместится в положение  $b_1-v_1$ , за вторые пол-оборота она вернется в исходное положение. Следовательно, за полный оборот шпинделя со шлифовальным инструментом все его периферийные точки зоны резания совершат перемещение вдоль оси вращения, равное величине амплитуды  $B$ .

В описании патента [166] отмечено, что применение данного способа улучшает качество за счет колебаний зоны резания.

## 7.5 Управляющая подсистема «Оптимизация процесса скругления острых кромок»

Управляющая подсистема оптимизации процесса скругления кромок деталей полимерно-абразивными инструментами разработана на основе математических моделей:

- производительности процесса обработки ( $\rho, r_{\phi}, Z_k$ );
- точности месторасположения (позиционирование) радиуса –  $\delta$ ;
- достижимой шероховатости поверхности скругленных кромок;
- износа инструмента;
- температуры в зоне резания;
- силы резания.

Структура подсистемы оптимизации при заданном инструменте представлена на рисунке 7.8.

Учитывая опыт авторов [57, 58, 262] в области оптимизации процессов абразивной обработки, в качестве критерия оптимизации целесообразно принять целевую экономическую функцию (далее – ЦЭФ), которая рассчитывается по приведенной ниже программе для определенного инструмента. ЦЭФ предназначена для оценки себестоимости всех вариантов процесса и выбора режимов обработки с наименьшим ее значением. Критерием выбора оптимального из рассматриваемых инструментов является минимальное значение ЦЭФ.

$$ЦЭФ = T_{обр} \cdot (C_T + Z_{эл}) + T_B \cdot C_T + C. \quad (7.5)$$

ЦЭФ включает в себя следующие целевые функции (ЦФ):

- ЦФ основного времени обработки  $T_{обр}$ ;
- ЦФ затрат на расход электроэнергии в единицу времени работы  $Z_{эл}$ ;

- ЦФ стоимости полимерно-абразивного инструмента на выполнение операции  $C$ .

Ограничительными функциями (ОФ) для различных инструментов являются уравнения достижимой шероховатости (4.23), (4.40), достижимого размера кромки (4.14), (4.39), (5.57) и температуры резания (5.59).



В состав ЦЭФ входят:

1. Измеряемые и регулируемые в процессе выполнения операции входные переменные. Для целевой функции (ЦФ) основного времени обработки  $T_{обр}$  такими переменными являются: скорость резания  $V$  (для торцевых щеток – частота вращения  $n$ ), деформация инструмента  $\Delta Y$ , продольная подача  $S$ .

2. Измеряемые и нерегулируемые в процессе выполнения операции входные переменные:

- для (ЦФ) основного времени обработки  $T_{обр}$  – это заданная по чертежу шероховатость обработанной кромки ( $Ra^K$ ); угол наклона обрабатываемой кромки ( $\beta$ ); физико-механические свойства обрабатываемого материала (модуль упругости  $E_k$ , коэффициент Пуассона  $\mu_k$ ); длина обрабатываемой кромки; средняя величина размера кромки (X и Y ( $Z_k$ )); все размеры инструмента, приведенные: для эластичных полимерно-абразивных кругов – в главе 3, для радиальных полимерно-абразивных щеток – в главе 4, для торцевых щеток – в главе 5);
- для ЦФ затрат на расход электроэнергии в единицу времени работы ( $Z_{эл}$ ) – это требуемая мощность привода ( $N_{эл}$ ), для определения которой (через  $P_z$ ) необходимы данные по эластич-

ным полимерно-абразивным кругам – размеры круга, физико-механические свойства обрабатываемого материала ( $K$  – предел текучести обрабатываемого материала на сдвиг); по радиальным полимерно-абразивным щеткам – модуль упругости ( $E_B$ ), коэффициент Пуассона ( $\mu_B$ ), плотность ( $\gamma_{ш}$ ); по торцевым щеткам – модуль упругости ( $E$ ), плотность ( $\gamma_{ш}$ ), а также стоимость одного кВт/ч ( $C_{ЭЛ}$ );

- для ЦФ стоимости полимерно-абразивного инструмента на выполнение операции ( $C$ ) – это собственно стоимость полимерно-абразивного инструмента ( $C_{кр}$ ,  $C_{ш}$ ); площади поперечных сечений на вершине ворсины ( $F_{BB}$ ) и в основании ( $F_{AA}$ ); – количество ворсин, участвующих в работе ( $N_{\theta}$ ); – плотность материала ворсины ( $\gamma_{\theta}$ ).

- для ЦЭФ в целом – это тарифная ставка рабочего ( $C_T$ ), вспомогательное время операции ( $T_{\theta}$ ).

3. Выходные параметры. Для ЦЭФ – себестоимость операции обработки кромки полимерно-абразивным инструментом.

#### **Основное время обработки**

$$T_r = \frac{l_r}{S}, \quad (7.6)$$

где  $l_r$  – длина обрабатываемой кромки, мм;  $S$  – подача вдоль кромки, мм/мин.

#### **Затраты на электроэнергию**

Для выполнения операции зачистки поверхности затраты на расход электроэнергии в единицу времени работы зависят от требуемой мощности на процесс резания и стоимости одного кВт/ч.

$$Z_{ЭЛ} = N_{ЭЛ} \cdot C_{ЭЛ}, \quad (7.7)$$

где  $C_{ЭЛ}$  – стоимость одного кВт/ч, руб;  $N_{ЭЛ}$  – требуемая мощность привода, в кВт:

$$N_{ЭЛ} = 60 \cdot P_z \cdot \pi \cdot D_k \cdot n / 10^6.$$

Здесь  $P_z$  – тангенциальная сила резания, Н (см. п. 4.1.2 для радиальных щеток и п. 5.1.2 для торцевых щеток);  $D_k$  – диаметр инструмента, мм;  $n$  – частота вращения инструмента, об/мин.

#### **Стоимость полимерно-абразивного инструмента на выполнение операции**

В процессе обработки кромки износ инструмента зависит от его интенсивности и продолжительности обработки. Стоимость изношенного инструмента на выполнение операции обработки кромки определяется по следующим формулам.

$$\text{Для эластичных полимерно-абразивных кругов: } C = \frac{4 \cdot C_{кр}}{\pi \cdot \{D_k^2 - [K_{изн} \cdot (D_k - d_k)]^2\}} \cdot I \cdot T_r, \quad (7.8)$$

где  $C_{кр}$  – стоимость инструмента, руб;  $d_k$  – диаметр втулки инструмента, мм;  $K_{изн}$  – коэффициент допустимого износа инструмента (рекомендуется  $K_{изн} = 0,5$ );  $I$  – интенсивность износа инструмента, которая рассчитывается для эластичных полимерно-абразивных кругов исходя из (3.76) и выражается в мм/мин.



$$\text{Для радиальных и торцевых щеток: } C = \frac{C_{щ} \cdot l_{изн} \cdot T_r}{l_B \cdot K_{изн}}, \quad (7.9)$$

где  $C_{щ}$  – стоимость щетки, руб;  $K_{изн}$  – коэффициент допустимого износа инструмента (рекомендуется  $K_{изн} = 0,5$ );  $l_{изн}$  – длина изношенной части ворсины по уравнению (4.35), мм;  $T_r$  – время обработки кромки по уравнению (7.6), мин;  $l_B$  – длина ворсины, мм.

Максимально допустимый износ полимерно-абразивного инструмента принят следующим:

- для полимерно-абразивных кругов: 50 – 70% от длины деформируемой части круга  $d = (R_k - r_k)$ ;
- для радиальных полимерно-абразивных щеток: 50 – 60% от длины ворсины  $l_B$ ;
- для торцевых полимерно-абразивных щеток: не более 50% от длины ворсины  $l_B$ .

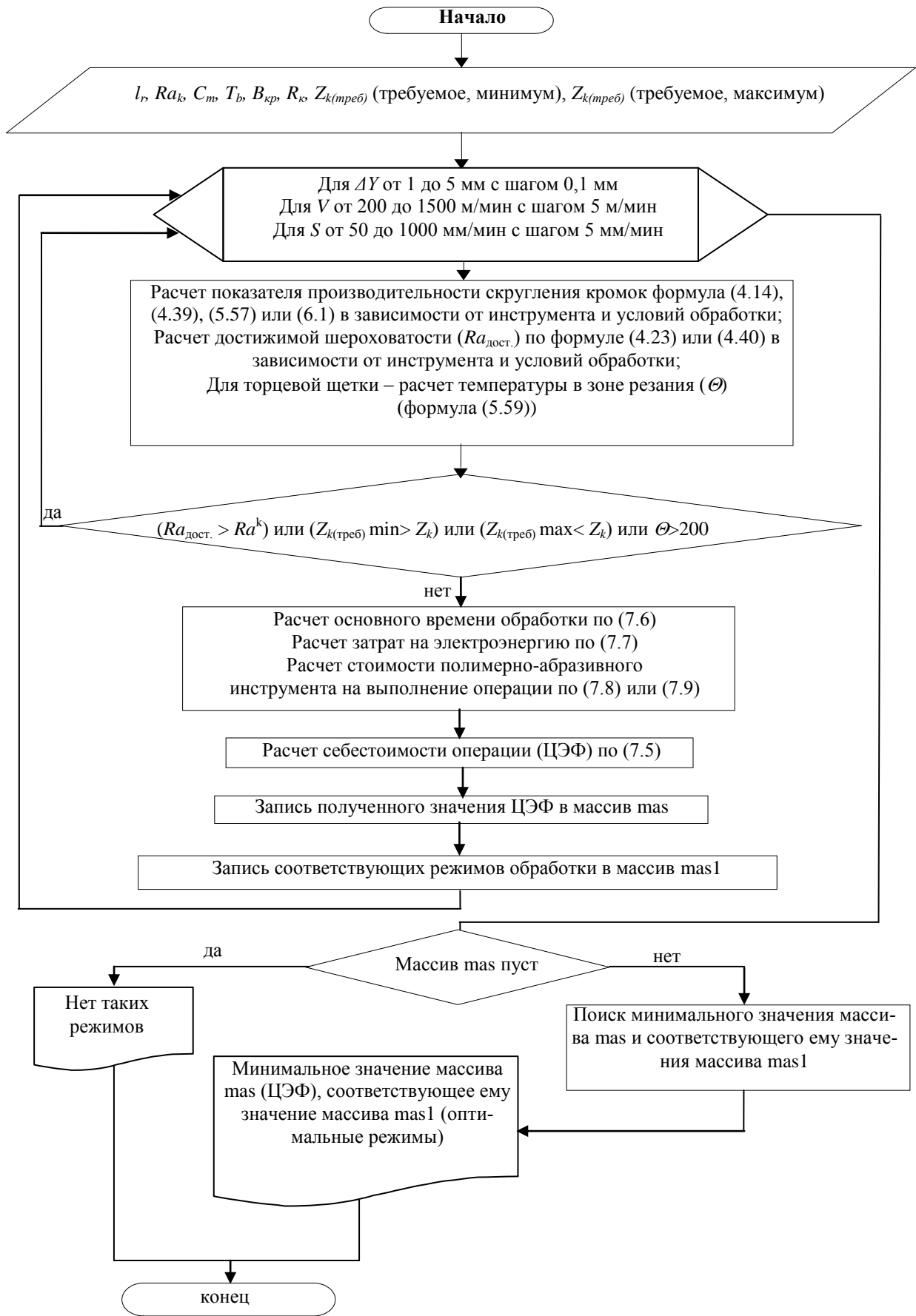
После достижения данных показателей существенно уменьшается эластичность инструмента и он подлежит замене.

## 7.6 Программа оптимизации процесса скругления острых кромок

Для проектирования технологической операции в соответствии с принципами, изложенными в п. 2.1, 7.1 и 7.5, разработан модуль программного обеспечения, позволяющий автоматизировать основные расчеты по оптимизации процесса обработки кромок полимерно-абразивными инструментами и прогнозированию основных результатов данной обработки. Данная программа разработана с помощью Borland C++ Builder 6.

Программа составляется для каждого из предполагаемых к применению инструментов. Такой программный модуль разработан для каждого из наиболее перспективных для скругления острых кромок полимерно-абразивных инструментов, а именно: эластичные полимерно-абразивные круги CF-FB 0,5AFIN, FS-WL 2SCRS и FS-WL 6SFIN; радиальных щеток BB-ZB Type C P120, BB-ZB Type C P220, BB-ZB Type C P400, BB-ZB Type A P36, BB-ZB Type A P50, а также торцевых щеток BD-ZB Bristle P50, BD-ZB Bristle P80, BD-ZB Bristle P120. В качестве примера, алгоритм программы поиска оптимальных режимов для полимерно-абразивного инструмента приведен на рисунке 7.9. Представленная программа позволяет определять оптимальные режимы обработки, исходя из требуемых размеров обрабатываемой кромки, а также шероховатости, требуемой по чертежу. Окно этой программы показано на рисунке 7.10. В качестве примера, в п. Г.3 приложения Г приведен исходный код программы, предназначенной для оптимизации процесса скругления кромок на деталях из сплава В95ПчТ2. Для титанового сплава VT20 программа выглядит аналогичным образом.

Представленная программа позволяет выбирать оптимальный инструмент и определять оптимальные режимы обработки полимерно-абразивными инструментами. Для решения задачи необходимо ввести все входные параметры – длину обрабатываемой кромки в мм, требуемый размер кромки (минимальное и максимальное значение) в мм, требуемую по чертежу шероховатость в мкм, тарифную ставку рабочего в рублях и вспомогательное время операции в минутах.



**Рисунок 7.9 – Алгоритм программного модуля поиска оптимальных технологических параметров скругления кромок полимерно-абразивным инструментом**

**Рисунок 7.10 – Окно программы расчета оптимального варианта процесса скругления кромок полимерно-абразивными щетками**

## 7.7 Реализация полученных результатов при скруглении кромок деталей полимерно-абразивными инструментами

По программе, рассмотренной в п. 7.6, рассчитаны рекомендуемые инструменты и параметры обработки (таблица 7.2). В зависимости от требуемого размера кромки и шероховатости обработанной поверхности предлагаются рекомендуемые инструменты и оптимальные режимы обработки (скорость резания, деформация инструмента, продольная подача и положение инструмента относительно обрабатываемой кромки – угол  $\alpha$  (для радиальных щеток)).

Как видно из таблицы 7.2, радиальные щетки являются оптимальными инструментами для скругления острых кромок по критерию «минимум себестоимости выполнения операции». Это объясняется их относительно невысокой стоимостью и хорошей износостойкостью.

**Таблица 7.2 – Рекомендуемые режимы резания при скруглении кромок деталей из алюминиевого сплава В95пчТ2 полимерно-абразивными инструментами**

Требуемый размер кромки, мм	$Ra^k$ (треб.), мкм	Рекомендуемый инструмент	$V$ , м/мин	$\Delta Y$ , мм	$S$ , мм/мин	$\alpha$
0,1–0,4	1,0	Щетка ВВ-ZB Type A P50	372	1,7	270	-8°
	1,6	Щетка ВВ-ZB Type A P50	372	1,7	270	-8°
	2,5	Щетка ВВ-ZB Type A P36	805	1,0	701	-8°
	3,2	Щетка ВВ-ZB Type A P36	805	1,0	701	-8°
	6,3	Щетка ВВ-ZB Type A P36	805	1,0	701	-8°

0,3–0,7	1,0	Щетка ВВ-ZB Type C P220	460	1,5	409	9°
	1,6	Щетка ВВ-ZB Type C P220	460	1,5	409	9°
	3,2	Щетка ВВ-ZB Type A P36	905	1,4	536	-8°
	6,3	Щетка ВВ-ZB Type A P36	905	1,4	536	-8°

Однако, для выполнения операций на некоторых труднодоступных участках деталей применение радиальных щеток не представляется возможным и необходимо применение торцевых щеток. В таблице 7.3 представлены оптимальные режимы при скруглении острых кромок торцевыми щетками.

**Таблица 7.3 – Рекомендуемые режимы резания при скруглении кромок деталей из алюминиевого сплава В95пчТ2 торцевыми полимерно-абразивными щетками**

Требуемый размер кромки, мм	$Ra^k$ (треб.), мкм	Рекомендуемый инструмент	$A$ , мм	$n$ , об/мин	$\Delta Y$ , мм	$S$ , мм/мин
0,1–0,4	2,5	Щетка BD-ZB Bristle P80	0	300	0,5	500
		Щетка BD-ZB Bristle P50	22	300	0,5	115
		Щетка BD-ZB Bristle P50	30	300	0,5	145
		Щетка BD-ZB Bristle P50	38	300	0,5	140
		Щетка BD-ZB Bristle P80	46	300	0,5	520
	3,2	Щетка BD-ZB Bristle P80	0	300	0,5	500
		Щетка BD-ZB Bristle P50	22	300	0,5	115
		Щетка BD-ZB Bristle P50	30	300	0,5	145
		Щетка BD-ZB Bristle P50	38	300	0,5	140
		Щетка BD-ZB Bristle P80	46	300	0,5	520
	6,3	Щетка BD-ZB Bristle P80	0	300	0,5	500
		Щетка BD-ZB Bristle P50	22	300	0,5	115
		Щетка BD-ZB Bristle P50	30	300	0,5	145
		Щетка BD-ZB Bristle P50	38	300	0,5	140
		Щетка BD-ZB Bristle P80	46	300	0,5	520
0,3–0,7	2,5	Щетка BD-ZB Bristle P120	0	300	0,5	440
		Щетка BD-ZB Bristle P80	22	300	0,5	560
		Щетка BD-ZB Bristle P80	30	300	0,5	555
		Щетка BD-ZB Bristle P80	38	300	0,5	575
		Щетка BD-ZB Bristle P120	46	300	0,5	605
	3,2	Щетка BD-ZB Bristle P120	0	300	0,5	440
		Щетка BD-ZB Bristle P80	22	300	0,5	560
		Щетка BD-ZB Bristle P80	30	300	0,5	555
		Щетка BD-ZB Bristle P80	38	300	0,5	575
		Щетка BD-ZB Bristle P120	46	300	0,5	605
	6,3	Щетка BD-ZB Bristle P120	0	300	0,5	440
		Щетка BD-ZB Bristle P80	22	300	0,5	560
		Щетка BD-ZB Bristle P80	30	300	0,5	555
		Щетка BD-ZB Bristle P80	38	300	0,5	575
		Щетка BD-ZB Bristle P120	46	300	0,5	605

С целью дальнейшего расширения возможностей разработанного программного обеспечения (см. п. 7.3 и 7.6), производству целесообразно иметь следующие базы данных:

- «Физико-механические свойства материалов заготовок»;
- «Характеристики оборудования, позволяющего осуществлять рассматриваемые технологические операции»;
- «Характеристики и свойства полимерно-абразивных инструментов».

## **7.8 Расчет экономической эффективности от внедрения разработанных технологий в условиях авиационного производства**

Проведен расчет эффективности от внедрения разработанной автоматизированной/механизированной технологии обработки поверхностей и скругления кромок с применением полимерно-абразивного инструмента в технологический процесс изготовления ближне-среднемагистрального узкофюзеляжного пассажирского самолета МС-21 на соответствующем производстве (Иркутский авиационный завод – филиал ПАО «Научно–производственная корпорация «Иркут»).

Результаты расчетов экономической эффективности приведены в п. Ж.1 приложения Ж и сведены в таблицу 7.4.

**Таблица 7.4 – Техничко-экономические показатели**

Наименование показателей		Период 2021–2023 гг.		После 2023 г.	
		До внедрения	После внедрения	До внедрения	После внедрения
Планируемый годовой выпуск продукции (самолетов МС-21), шт		20		70	
Средняя трудоемкость отделочно-зачистных операций, час	Крупногабаритные и (или) длинномерные детали	4,5	3	4,5	3
	Малогабаритные детали	0,5	0,33	0,5	0,33
Необходимое количество оборудования, шт		–	2	–	6
Расходы на заработную плату и необходимые социальные нужды, млн. руб.		2,02	1,154	6,35	3,46
Амортизация, техническое обслуживание и ремонт оборудования, млн. руб.		–	3,35	–	9,82
Общехозяйственные расходы, млн. руб.		1,725	1,144	6,037	4,004
Итоговая технологическая себестоимость рассматриваемых операций (включая затраты на инструмент и амортизацию оборудования), млн. руб.		9,97	7,635	34,22	24,82
<b>Годовой экономический эффект, млн. руб.</b>		<b>2,335</b>		<b>9,4</b>	

## Результаты и выводы по главе 7

1. Разработанная система оптимального управления проектированием операций финишной обработки деталей полимерно-абразивными инструментами, состоящая из входных параметров, пространства состояний и выходных параметров, обеспечивает оптимальное проектирование технологической операции и выпуск качественной продукции.
2. Созданная система контроля входных параметров (заготовки, оборудования, инструмента), проведение пробной операции с последующим анализом дефектов и причин их возникновения, а также формирование управляющего воздействия по результатам анализа, позволяет обеспечить устойчивость и воспроизводимость системы управления с минимизированным воздействием возмущающих факторов.
3. Эффективным управляющим воздействием при возмущающих факторах, связанных со стохастическим характером входных параметров, является корректировка режимных параметров обработки  $V$  ( $n$  для торцевых щеток),  $\Delta Y$  и  $S$ , обеспечивающих требуемые съем материала и параметры качества.
4. Разработанные подсистемы оптимизации зачистки плоскостей и скругления кромок эластичными полимерно-абразивными кругами и щетками эффективно решают поставленные задачи, поскольку включают в себя весь спектр факторов, влияющих на себестоимость выполнения операции при обеспечении оптимальной производительности и требуемого качества. Они основаны на базе использования целевых (основного времени обработки, затрат на расход электроэнергии в единицу времени работы, стоимости полимерно-абразивного инструмента на выполнение операции) и ограничительных функций (достижимой шероховатости и температуры резания).
5. Разработанные программы оптимизации обработки плоскостей и скругления кромок эластичными полимерно-абразивными кругами и щетками позволили выработать технологические рекомендации с оптимальными параметрами обработки (оптимальный полимерно-абразивный инструмент и режимы обработки).
6. Внедрение разработанных технологий на Иркутском авиационном заводе – филиале ПАО «Корпорация «Иркут» позволяет повысить производительность труда при финишных операциях зачистки поверхностей и скругления кромок деталей каркаса самолета (до 1,5–2 раз) при обеспечении всех требований к качеству изделий. Общий экономический эффект от реализации мероприятий по механизации/автоматизации ручного труда и внедрения комплексной технологии финишной обработки деталей полимерно-абразивными инструментами составит до 9,4 млн. рублей в год.

## Заключение

В результате проведенного комплекса исследований, установлена целесообразность применения эластичных полимерно-абразивных кругов и щеток в авиастроении для выполнения таких финишных операций как обработка поверхностей деталей из алюминиевых сплавов и скругление кромок на деталях из алюминиевых и титановых сплавов. Рациональное применение данных инструментов позволяет решить актуальную для современного машиностроения задачу по замене ручного труда на механизированный и автоматизированный и обеспечить все требования по качеству обработанных поверхностей и кромок на деталях каркаса самолета.

Разработанные теоретические положения оптимального управления проектированием операций финишной обработки полимерно-абразивными инструментами в области машиностроения, полученные на базе системного анализа, являются новыми знаниями и могут быть распространены и на другие сферы инженерной науки.

В результате выполненной работы получены следующие результаты:

1. Разработанная система оптимального управления проектированием операций финишной обработки полимерно-абразивными инструментами, состоящая из входных параметров, пространства состояний и выходных параметров, обеспечивает оптимальное проектирование технологических операций, выпуск качественной продукции и является устойчивой к воздействию возмущающих факторов на всех уровнях проектирования.
2. Разработанные на основе системного анализа исследуемого процесса теоретические положения, описывающие взаимосвязи производительности процесса и качества обработанной поверхности с режимными параметрами обработки, физико-механическими свойствами обрабатываемого материала и характеристиками инструмента, позволили создать комплекс аналитических математических моделей (подсистем). К ним относятся математические модели: силового взаимодействия эластичных полимерно-абразивных кругов и торцевых щеток с обрабатываемой поверхностью, радиальных и торцевых полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой кромкой, съема материала (производительности процесса) и шероховатости обработанной поверхности при зачистке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами.
3. Математическая модель силового взаимодействия режущего микрорельефа эластичных полимерно-абразивных кругов с обрабатываемой поверхностью является основой при математическом моделировании процесса съема материала (производительности процесса обработки), формирования шероховатости, температуры в зоне резания и остаточных напряжений.
4. Результаты теоретических исследований сил при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами, радиальными и торцевыми щетками, являются исходными данными для решения проблемы вычисления целевой функции расхода электроэнергии, а также для объяснения зависимостей исследуемых эмпирически параметров (производительность процесса обработки, шероховатость поверхности, геометрическая точность кромки, износостойкость ин-

струмента) от физико-механических свойств материала инструмента и режимных параметров обработки.

5. Разработанные математические модели для расчета съема материала с поверхности детали (производительности процесса обработки) и шероховатости обработанной поверхности, основанные на теоретических положениях взаимодействия режущего микрорельефа эластичных полимерно-абразивных кругов с обрабатываемой поверхностью, а также экспериментальные математические модели формирования кромки эластичными полимерно-абразивными кругами и щетками, позволяют аналитически определять производительность процесса и качество (по микрогеометрии и месторасположению обработанной кромки) и эффективно управлять режимными параметрами обработки, в том числе при их корректировке в случае воздействия возмущающих факторов.

6. Разработанные математические модели температуры, возникающей в зоне обработки при зачистке плоскостей эластичными полимерно-абразивными кругами и торцевыми щетками, основанные на теоретических положениях взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемой поверхностью, а также экспериментальные математические модели температуры при обработке кромки исследованными щетками, позволяют аналитически определять температуру, к которой очень чувствительна полимерная связка инструментов и эффективно управлять режимными параметрами обработки с целью исключения оплавления поверхностного слоя инструмента и его катастрофического износа.

7. На основе разработанных теоретических положений формирования остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое материала при обработке плоскостей эластичными полимерно-абразивными кругами, доказано, что в поверхностном слое формируются только сжимающие остаточные напряжения в диапазоне 20...270 МПа, на малой глубине залегания (не более 0,04 мм), которые положительно влияют на эксплуатационные свойства деталей

8. Установлено, что обработка кромок на робототехническом комплексе (РТК), который обладает заниженной, по сравнению с другим металлорежущим оборудованием, жесткостью и повышенной чувствительностью к колебательным явлениям, с высокими скоростями резания/частотами вращения (скорость до 2000 м/мин при обработке радиальными щетками и частота вращения до 6000 об/мин при обработке торцевыми щетками) при соответствующей балансировке инструмента идет стабильно при сохранении высокого качества обработанной поверхности. Следовательно, РТК может успешно применяться в производственных условиях при использовании полимерно-абразивных инструментов.

9. В рамках системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки, предложены управляющие подсистемы оптимизации зачистки плоскостей и скругления кромок эластичными полимерно-абразивными кругами и щетками с критерием минимума себестоимости выполнения операции. Они являются наиболее эффективными, поскольку включают в себя весь спектр факторов, влияющих на себестоимость выполнения операции при обеспече-



нии оптимальной производительности и требуемого качества. Управляющие подсистемы оптимизации основаны на базе использования целевых и ограничительных функций.

10. Разработанное программное обеспечение, реализующее предложенную совокупность теоретических положений и эмпирических зависимостей, позволяет эффективно управлять процессами финишной обработки на основе оптимизационных решений по выбору оптимального полимерно-абразивного инструмента и режимных параметров обработки при зачистке поверхностей и скруглении кромок деталей из алюминиевых и титановых сплавов при минимальной себестоимости операции и стабильно обеспечивать требуемые НТД показатели качества обработанной поверхности в достаточно широком диапазоне: по шероховатости обработанных поверхностей и кромок  $Ra$  0,7...4,5; по размеру кромок  $0,1 \dots 1$  мм.

11. Обеспечение устойчивости и воспроизводимости системы оптимального управления проектированием операций финишной обработки с минимизированным воздействием возмущающих факторов достигается путем контроля входных параметров (заготовки, оборудования, инструмента), проведения пробной операции с последующим анализом дефектов и причин их возникновения и формированием управляющего воздействия по результатам анализа. Очень эффективным управляющим воздействием при возмущающих факторах, связанных со стохастическим характером входных параметров, является корректировка режимных параметров обработки – скорости резания  $V$  (частоты вращения  $n$  для торцевых щеток), деформации инструмента  $\Delta Y$  и подачи  $S$ , обеспечивающих требуемые съем материала и параметры качества.

12. Допустимыми, из условий стабильной работоспособности исследованных инструментов, параметрами по деформации инструмента и скорости резания являются:

- для полимерно-абразивных кругов марок FS-WL 8A MED, FS-WL 6S FIN, DB-WL 8S MED: деформация ( $\Delta Y$ ) 0,5–2 мм, скорость ( $V$ ) 200–700 м/мин, подача ( $S$ ) 42–395 мм/мин; для круга марки FS-WL 2S CRS: деформация ( $\Delta Y$ ) 1–3 мм, скорость ( $V$ ) 250–1000 м/мин, подача ( $S$ ) 42–395 мм/мин; для круга марки CF-FB 0,5A FIN: деформация ( $\Delta Y$ ) 3–4,5 мм, скорость ( $V$ ) – 250–1000 м/мин, подача ( $S$ ) 42–395 мм/мин;
- для радиальных полимерно-абразивных щеток:  $\Delta Y = 1 - 5$  мм,  $V = 15 - 800$  м/мин. Подача  $S$  выбирается в зависимости от требуемой производительности процесса и возможностей оборудования;
- для торцевых полимерно-абразивных щеток:  $\Delta Y = 0,5 - 2,5$  мм,  $V = 15 - 700$  м/мин. Подача  $S$  выбирается в зависимости от требуемой производительности процесса и возможностей оборудования.

13. Разработан эскизный проект станка с ЧПУ, в котором предусмотрена одновременная эффективная обработка кромок двумя эластичными полимерно-абразивными щетками. Внедрение данного оборудования в условиях авиационного производства позволит успешно обрабатывать

кромки длинномерных деталей каркаса самолета и эффективно заменять ручной труд на механизированный/автоматизированный.

14. Проведенный анализ возможностей обработки полимерно-абразивными инструментами, позволяет сделать вывод о целесообразности применения этого метода в производственных условиях путем:

- создания специальных станков для выполнения финишных операций;
- назначения дополнительного завершающего перехода при обработке на многоинструментальном станке с программным управлением;
- создания специального роботизированного рабочего места;
- организации рабочего места, состоящего из металлообрабатывающего станка с программным управлением и роботизированной зачистной установки;
- обработки на универсальном металлообрабатывающем станке.

15. Полученные результаты проведенных исследований в области финишной обработки полимерно-абразивным инструментом следует считать новым научным направлением в области абразивной обработки, имеющим межотраслевое значение. Экономический эффект от внедрения предложенных технологий при серийном производстве самолета МС-21 на Иркутском авиационном заводе – филиале ПАО «Корпорация «Иркут» составит до 9,4 млн. рублей в год. Также, в настоящее время, результаты проведенного исследования апробированы и внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», а также и в других сферах инженерной деятельности, в частности:

- кузовной ремонт автомобилей (ООО «Горсвет», г. Иркутск, годовой экономический эффект свыше 200 тыс. рублей в год за счет снижения трудоемкости отделочно-зачистных операций);
- строительно-отделочные работы (ООО «Беркут», г. Иркутск, экономический эффект свыше 120 рублей в расчете на 1 м<sup>2</sup> площади, за счет снижения трудоемкости отделочно-зачистных операций и уменьшения времени простоя помещений).

## Словарь основных условных обозначений

$A$  ( $A_i$ ) – смещение относительно оси щетки.

$B$  – ширина обрабатываемого образца (обработки, обрабатываемой поверхности).

$B_k$  – ширина круга.

$C$  – стоимость эластичного абразивного круга на выполнение операции.

$C_3 = 0,57722$  – постоянная Эйлера.

$C_r$  – жесткость круга.

$d$  – длина деформируемого участка круга

$d_{щ}$  – диаметр щетки.

$d_k$  – диаметр отверстия в инструменте.

$D_k$  – диаметр круга.

$dS$  – единичная площадь контакта.

$E$  – модуль упругости Юнга.

$E_{см}$  – модуль упругости первого рода при смятии из уравнения.

$F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n$  – процессы.

$f_1(\gamma)$  – плотность вероятности распределения высот для всего предела от  $-\infty$  до  $+\infty$ .

$f_2(\gamma)$  – плотность вероятности распределении относительных высот максимумов  $\gamma$  в пределах сближения.

$f_y$  и  $f_z$  – безразмерные коэффициенты сил.

$G_1$  и  $G_2$  – масса круга до и после обработки соответственно.

$g_1$  и  $g_2$  – масса образца до и после обработки соответственно.

$G_I, G_{II}$  и  $G_T$  – критерий Граббса исключения грубых погрешностей.

$h_T$  – теоретическая высота сегмента.

$h$  – фактическая высота сегмента.

$I$  – износ круга за единицу времени.

$I_6$  – износ круга за единицу времени в расчете на 1 ворсину.

$J$  – ударный импульс.

$J_M$  – структура системы.

$k$  – относительная погрешность радиуса по круглости.

$k_I$  – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью  $P$  и числом  $m$  составляющих входных показателей и их соотношением между собой.

$K$  – предел текучести обрабатываемого материала на сдвиг.

$K_I$  – коэффициент, зависящий от закона распределения стохастических входящих величин и принятой доверительной вероятности.

$K_{дл}$  – параметр удельного изменения длины ворсины.

$K_M$  – коэффициент, зависящий от свойств материалов тел и кривизны их поверхностей при обработке радиальными полимерно-абразивными щетками.

$K_{\Pi}$  – коэффициент, зависящий от свойств материалов тел и кривизны их поверхностей при обработке торцевыми полимерно-абразивными щетками.

$K_M$  – композиция системы.

$K_d$  – количество дисков в щетке.

$K_{уп}$  – количество ворсин щеточного диска, одновременно действующих на кромку.

$K_{ш}$  – коэффициент, учитывающий ширину обрабатываемой поверхности.

$L$  – путь перемещения поверхности круга (щетki) относительно детали (кромки).

$l$  – длина обрабатываемой поверхности.

$l_B$  – длина ворсины.

$l_r$  – длина обрабатываемой кромки.

$l_{уд}$  – длина участка, на котором длится ударный процесс.

$L_K$  – длина участка контакта при заданной деформации круга  $\Delta Y$ .

$l_{изн}$  – длина изношенной части ворсины.

$l_{ист}$  – характерный размер источника.

$M$  – момент площади деформированного участка круга.

$m$  – число максимумов.

$m_B$  – масса ворсины.

$m_d$  – масса деформированного материала круга.

$m_T$  – значение напряжения течения (напряжения, превышающего предел текучести).

$M_K$  – масса круга.

$m_K$  – составляющая массы круга, приложенная в точке контакта.

$M_M$  – механический эквивалент тепловой энергии.

$N$  – количество зерен контакта на площади  $1 \text{ мм}^2$ .

$N_B$  – количество ворсин.

$N_1$  – количество ворсин на единице площади.

$N_M$  – механическая мощность процесса.

$N_{имп}$  – число тепловых импульсов при обработке цилиндрическим кругом.

$N_K$  – количество актов взаимодействия за единицу времени на единице площади обрабатываемой поверхности.

$N_{общ}$  – общее количество ворсин на щетке.

$N_{прох}$  – количество проходов.

$n$  – частота вращения круга (щетki).

$n(0)$  – число нулей (пересечений со средней линией).

$n_d$  – показатель деформационного упрочнения материала.

$n_n$  – коэффициент, характеризующий изменение скорости напряжений.

$n_n$  – количество циклов пластического деформирования, необходимое для разрушения материала.

$p$  – фактический размер снятой кромки.

$P$  – сила.

$P_{ц}$  – центробежная составляющая силы.

$P_{уп}$  – упругая составляющая силы.

$P_K$  – сила, действующая со стороны инструмента.

$P_t$  – фиктивная сила от температуры.

$p_T$  – теоретический размер снятой кромки.

$P_x$  – сила, действующая по оси X.

$P_y$  – сила, действующая по оси Y.

$P_z$  – сила, действующая по оси Z.

$P_{xyz}$  – равнодействующая составляющих сил резания.

$P_{z уд}$  – сила удара.

$P_y^1$  – нормальная составляющая силы резания на единичном зерне.

$P_z^1$  – тангенциальная составляющая силы резания на единичном зерне.

$R$  – функция глобальной реакции системы  $\Sigma$ .

$r$  – расстояние от точки приложения силы до элемента в полярной системе координат.

$r_l$  – радиус закругления вершины абразивного зерна (или индентора).

$r_i$  – радиус, на котором расположена ворсина щетки.

$R_0$  – радиус приложения центра массы круга.

$r_T$  – теоретический радиус скругления.

$r_\phi$  – фактический радиус скругления.

$z_\varepsilon$  – эквивалентный радиус закругления вершин неровностей.

$Ra^K$  – заданная по чертежу шероховатость обработанной поверхности

$Ra^0$  – исходная шероховатость обрабатываемой поверхности

$R_D$  – радиус детали.

$R_l$  – расстояние от точки до источника.

$R_i$  – расстояние от центра круга до центра тяжести элементарного участка.

$R_{щ} (R_k)$  – радиус инструмента.

$r_{щ} (r_k)$  – радиус инструмента (наименьший радиус рабочей зоны торцевой щетки).

$RS$  – средний шаг по вершинам неровностей.

$RS_m$  – средний шаг (по средней линии).

$R_q$  – среднее квадратичное отклонение профиля.

$R_{ц}$  – расстояние от центра круга до центра тяжести.

$R_{щ}, r_{щ}$  – радиус рабочей части щетки.

$S$  – подача (режим обработки).

$S_{пл}$  – площадь, равная объему упругодеформированного материала круга на 1 мм ширины круга.  
 $S_c$  – площадь поперечного сечения стружки на единичном зерне.  
 $S_k$  – площадь контакта.  
 $S_{сегм}$  – площадь сегмента ABC.  
 $S_B$  – площадь контакта круга с обрабатываемой поверхностью после упруго-вязкого восстановления.  
 $S_i$  – площадь щетки, находящаяся в контакте.  
 $S_i$  – среднее квадратичное отклонение  $i$ -го стохастического входного параметра.  
 $s_p$  – число перегибов.  
 $S_{\bar{X}}$  – среднее квадратичное отклонение среднего арифметического.  
 $S_{общ}$  – общая площадь рабочей части щетки.  
 $S_{\Sigma}$  – суммарное среднее квадратичное отклонение стохастических входных величин для каждого выходного показателя операции;  
 $s$  – средневероятный шаг между активными зернами.  
 $t$  – коэффициент Стьюдента.  
 $t^\circ$  – температура резания.  
 $t_{уд}$  – время удара.  
 $t_x$  – время контакта ворсины с кромкой.  
 $T$  – время обработки.  
 $T_0$  – время обработки длины  $L$ .  
 $T_I$  – время обработки поверхности за один проход.  
 $T_{зач}$  – время для выполнения операции зачистки.  
 $T_r$  – допуск радиуса скругления.  
 $Q$  – относительный съем.  
 $q$  – удельный съем.  
 $q_k$  – количество материала, снятого при скруглении кромки шириной щетки  $B_K = 1$  мм и подаче  $S = 1$  мм/мин.  
 $Q_c$  – объем материала, вытесненного в виде стружки за один удар.  
 $Q_p$  – множество (глобальных) состояний.  
 $Q_{пл}$  – объем материала, разрушенного в результате пластического полидеформирования, приходящегося на один удар  
 $Q_{доп}$  – дополнительный объем материала при наложении химического, электрохимического, электроимпульсного и других процессов на основной механический.  
 $Q_m$  – общая тепловая мощность процесса.  
 $Q_f$  – объем материала, который необходимо удалить.  
 $Q_d$  – теплота, эквивалентная работе деформации.  
 $Q_{тр,i}$  – теплота, эквивалентная работе трения на каждом из  $m$  участков, где она возникает.

$Q_k$  – количество материала снятого при скруглении кромки.

$Q_{\text{общ}}$  – общая площадь рабочей части щетки.

$V$  – скорость резания.

$V_k$  – скорость удара.

$V_M = \{V_{j}\}_j$  – множество связей.

$v_{\text{ц}}$  – скорость вращения центра тяжести деформированного материала круга.

$V_{\text{ист}}$  – скорость движения источника.

$V_i$  – скорость движения единичной массы.

$V_n$  – скорость удара ворсины по обрабатываемой кромке.

$W$  – прогиб ворсины.

$\bar{X}$  – средняя величина по осям  $X$  и  $Y$ .

$X_j$  – граница  $j$ -ой составляющей входного параметра.

$y(e)$  – глубина внедрения режущих выступов в обрабатываемый материал.

$Z$  – зернистость круга.

$Z_k$  – средний размер кромки.

$\gamma$  – сближение режущего микрорельефа эластичного абразивного круга с обрабатываемой поверхностью, выраженное в относительных величинах.

$\gamma_{al}$  – плотность для материала В95пчТ2.

$\gamma_k$  – плотность материала круга.

$\gamma_b$  – плотность материала ворсины (плотность материала щетки).

$\gamma_0$  – математическое ожидание относительных высот максимумов.

$\alpha$  – угол, характеризующий положение круга относительно обрабатываемой кромки.

$\alpha_0$  – коэффициент линейного расширения.

$\delta$  – отклонение месторасположения (позиционирование).

$\Delta$  – припуск на обработку.

$\Delta$  – границы погрешности оцениваемой величины (без учета знака).

$\Delta h$  – отклонение фактического сегмента от теоретического.

$\frac{\partial}{\partial x_i}$  – передаточное отношение (коэффициент влияния) на функцию  $X_j$  параметра  $x_i$ , влияющего на показатель качества.

$\Delta Y$  – деформация инструмента.

$\Delta Y_c$  – средневзвешенная деформация круга.

$\Sigma$  – система.

$\Sigma = \{\Sigma_i\}_i$  – множество элементов и их свойств (подсистем).

$\varepsilon$  – доверительные границы (без учета знака) случайной погрешности оценки измеряемой величины.

$\varepsilon$  – относительная средневзвешенная деформация круга.

$\dot{\varepsilon}$  – скорость изменения относительной деформации.  
 $\varepsilon_i$  – интенсивность деформации.  
 $\varepsilon_{it}$  – интенсивности температурной деформации.  
 $\varepsilon_m$  – деформация, при которой логарифмическая деформация равна единице.  
 $\varepsilon_T$  – деформация, соответствующая пределу текучести.  
 $\varepsilon_x$  – относительная деформация по оси X.  
 $\varepsilon_y$  – относительная деформация по оси Y.  
 $\varepsilon_z$  – относительная деформация по оси Z.  
 $\varepsilon_\theta$  – относительная деформация круга при упруго-вязком восстановлении.  
 $\dot{\varepsilon}_B$  – скорость вязкой деформации.  
 $\varepsilon_E$  – относительная величина внедрения зерен.  
 $\Theta_\Sigma$  – доверительные границы показателей качества в результате выполнения операции.  
 $\mu$  – коэффициент Пуассона.  
 $\mu_m$  – коэффициент пластического трения.  
 $\omega$  – коэффициент температуропроводности тела, в котором движется источник.  
 $\omega_p$  – коэффициент температуропроводности зерна.  
 $\lambda_t$  – коэффициент теплопроводности.  
 $\rho$  – относительный снятый слой кромки.  
 $\rho_n$  – безразмерная величина, равная отношению критерия Пекле к числу тепловых импульсов.  
 $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение профиля.  
 $\sigma_2$  – вторая производная среднего квадратического отклонения случайного процесса.  
 $\sigma_{cp}$  – среднее напряжение.  
 $\sigma_r$  – радиальные напряжения.  
 $\sigma_y$  – напряжения по оси Y.  
 $\dot{\sigma}_B$  – скорость напряжений при вязкой деформации.  
 $\sigma_\theta$  – увеличение напряжения при упруго-вязком восстановлении.  
 $\dot{\sigma}_B$  – скорость напряжений при вязкой деформации.  
 $\sigma_i$  – интенсивность напряжения.  
 $\sigma_{it}$  – интенсивности температурного напряжения.  
 $\sigma_T$  – предел текучести при линейном пластически напряженном состоянии.  
 $\tau_{yn}$  – время нахождения ворсины в контакте с кромкой.  
 $\tau_{вр}$  – время поворота щетки на 1 шаг.  
 $\chi$  – коэффициент линейной вязкости вещества.  
 $\mathcal{E}_s$  – эффективность выполнения  $s$ -ой функции.



## Список литературы

1. Абразивная и алмазная обработка материалов : справочник / под ред. А.Н. Резникова. – М. : Машиностроение. 1977. 391 с.
2. Абрашкевич Ю.Д., Мачишин Г.М. Эффективная эксплуатация полимерно-абразивной щетки // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2016. Вып. 73. С. 59–62.
3. Абрашкевич Ю.Д., Оглоблинский В.А., Оглоблинский А.В. Щеточные инструменты на основе полимерно-абразивных // Мир техники и технологий. 2006. № 5. С. 50–52.
4. Абрашкевич Ю.Д., Пелевин Л.Е., Мачишин Г.М. Механизм взаимодействия полимерного абразивсодержащего волокна с обрабатываемой поверхностью // Современные информационные и инновационные технологии на транспорте (MINTT - 2011) : материалы III Международной научно-практической конференции : в 2-т. Т. 1. – Херсон: Издательство Херсонского государственного морского института, 2011. С. 104–108.
5. Абрашкевич Ю.Д., Пелевин Л.Е., Мачишин Г.М. Влияние тепловых процессов на работоспособность полимерно-абразивной щетки. // Промышленное строительство и инженерные сооружения : научно – производственный журнал. 2011. № 3. С. 44-47.
6. Абрашкевич Ю.Д., Пелевин Л.Е., Мачишин Г.М. Механизм колебания полимерно-абразивного волокна при стационарном вращении щетки // Современные информационные и инновационные технологии на транспорте (MINTT - 2012) : материалы IV Международной научно-практической конференции : в 2-т. Т. 1. – Херсон : Херсонская государственная морская академия, 2012. С. 60-65.
7. Абрашкевич Ю.Д., Пелевин Л.Е., Мачишин Г.М. Динамика колебания полимерно-абразивного волокна в случае горизонтального расположения диска щетки // Современные энергетические установки на транспорте и технологии и оборудование для их обслуживания (СЕУТТОО- 2012) : Всеукраинская научно-практическая конференция, 10-12 октября 2012 г. – Херсон : Херсонская государственная морская академия. 2012. С. 72-75.
8. Абрашкевич Ю.Д., Пелевин Л.Е., Мачишин Г.М. Моделирование процесса теплообмена полимерно-абразивной щетки и поверхности // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы Междунар. научн.-техн. конф. 2014. С. 3-7.
9. Аврутин Ю.Д. Описание рельефа рабочей поверхности шлифовального круга и анализ процесса формирования рельефа шлифованной поверхности // ВНИИАШ: сб. научн. тр. Вып.14. 1973. С. 27 – 39.
10. Александров А.А. Прогнозирование остаточных напряжений возникающих при термообработке алюминиевых сплавов // Электронный журнал «Инженерный вестник Дона». №4. 2015.

11. Александрова И.С. Исследование возможностей для управления микрогеометрией режущей поверхности абразивных инструментов. // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Серия Машиностроение. №58, 2010. С. 282–288.
12. Анамир групп: [электронный ресурс]. URL: <http://www.anamir-group.ru/> (дата обращения 05.07.2018).
13. А.с. 1196242. СССР, МКИ 24D 13/00 / Х.А. Мамин и др. Опубл. 07.12.85. Бюл. № 20.
14. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. М. : Физматгиз. 1963. 472 с.
15. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей. М.: Машиностроение. 1974.– 136 с.
16. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Повышение интенсивности вибрационной обработки // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента: межвузовский сборник научных трудов. Пенза: Пензенский политехнический институт. 1987. Вып.15. С.56-58.
17. Бабичев А.П. Исследование технологических основ обработки деталей в среде колеблющихся тел (вибрационной обработки) с использованием низкочастотных вибраций // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора техн. наук. Тула. 1975. 62 с.
18. Банников А.И., Макарова О.А., Соловьева В.И. Исследование качества обработки края трубы однорядной цилиндрической щеткой // Известия Волгоградского государственного технического университета. №8 (187). 2016. С. 7–9.
19. Барановский Ю.В. и др. Режимы резания металлов. Справочник. М.: Издательство: Научно-исследовательский институт технологии автомобильной промышленности. 1995.
20. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высшая школа. 1968. 512 с.
21. Бейнертс З.К., Рудзит Я.А., Кризберг Ю.Я. Исследование вероятностных характеристик кривизны микронеровностей при высоких уровнях поверхности // Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин. Рига: Рижский политехнический институт. 1981. С. 5-21.
22. Белевский Л.С. и др. Ударно-фрикционная комбинированная обработка гибким инструментом // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. №4 (48). 2014. С.53–57.
23. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз. 1963. 239 с.
24. Бишутин С.Г. Технологическое обеспечение требуемых значений совокупности параметров качества поверхностного слоя деталей при шлифовании с наибольшей производительностью. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора техн. наук / Брян. гос. техн. ун-т (БИТМ). Брянск. 2005.
25. Богомоллов Н.И. Влияние смазки на силу трения при микрорезании металлов // Теория смазочного действия на новые материалы. М.: Наука. 1965. С. 97–102.

26. Богуцкий Б.В., Братан С.М. Анализ существующих моделей и разработка стратегий управления процессом электрохимического шлифования (ЭХШ) // Theoretical & Applied Science. № 1 (57). 2018. С. 38 – 45.
27. Богуцкий В.Б., Братан С.М. Анализ процесса шлифования стружечных канавок протяжек // Прогресивні технології і системи машинобудування. № 3 (49). 2014. С. 15-22.
28. Богуцкий В.Б., Братан С.М., Ярошенко А.А. Моделирование процессов шлифования и заточки поверхностей зубьев протяжек // Вісник СевНТУ. № 151. 2014. С. 14-23.
29. Болтянский В.Г. Оптимальное управление дискретными процессами // М: Наука. 1973. 448с.
30. Бондаренко М.А., Чапышев А.П. О разработке установки с численным программным управлением для зачистки криволинейных поверхностей // Вестник ИрГТУ. №10 (57). 2011. С. 24–29.
31. Братан С.М., Колесов А.Г., Стадник Т.В., Рощупкин С.И. Стратегия управления процессами ленточного шлифования в автоматизированном производстве // Вестник современных технологий. № 4 (8). 2007. С. 23 – 28.
32. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. Для инженеров и учащихся вузов. Изд. 7-е стереотипное. М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры. 1957. 608 с.
33. Брянский Л.Н., Дойников А.С. Краткий справочник метролога. М.: Издательство стандартов. 1991. 79 с.
34. Буре В.М., Грауэр Л.В. Лекция 10. Мультиколлинеарность. Робастные регрессионные модели. Логит-регрессия: [электронный ресурс]. URL: [https://compscicenter.ru/media/slides/math\\_stat\\_2013\\_spring/2013\\_04\\_24\\_math\\_stat\\_2013\\_spring.pdf](https://compscicenter.ru/media/slides/math_stat_2013_spring/2013_04_24_math_stat_2013_spring.pdf) (дата обращения 05.07.2018).
35. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
36. Виды абразивной обработки: [электронный ресурс]. URL: <http://www.navigator-beton.ru/articles/vidy-abrazivnoj-obrabotki.html> (дата обращения 20.12.2017).
37. Виноградов В.Н., Сорокин Т.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание // М.: Машиностроение. 1990. 224 с.
38. Гаркунов Д.Н. Триботехника // М.: Машиностроение. 1985. 424 с.
39. Гдалевич А.И. Финишная обработка лепестковыми кругами. М.: Машиностроение. 1990. 112 с.
40. Герновский Г.И. Износостойкость твердых сплавов и закаленных инструментальных сталей // Трение и износ при резании металлов. – М. : 1955. С. 14–31.
41. Гольдсмит В. Удар. М. : Госстройиздат. 1965. 448 с.
42. Гордиенко А.В., Козулько Н.В. Обработка деталей из полимерных композиционных материалов лепестковыми кругами различной зернистости под операцию склеивание. В сборнике: Технологии, инновации и предпринимательство сборник научных трудов по материалам I

Международной научно-практической междисциплинарной конференции. НОО «Профессиональная наука». г. Санкт-Петербург. 2017. С. 69–77.

43. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. М., 2013. 23 с.

44. ГОСТ 12456-83. Межгосударственный стандарт. Фибра для шлифовальных дисков. Технические условия (с изменением N1). М., 1999. 6 с.

45. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики (с Изменениями N 1, 2). М., 2006. 8 с.

46. ГОСТ 30055-93. Канаты из полимерных материалов и комбинированные. Технические условия. М., 2003. 42 с.

47. ГОСТ 4126-82. Шаблоны радиусные. Технические условия. (отменен с 1988 г. взамен введены ТУ 2-034-228-87. Шаблоны резьбовые и радиусные. М., 1987. 29 с.).

48. ГОСТ 8692-88. Диски шлифовальные фибровые. Технические условия (с изменениями). М., 1998. 11 с.

49. ГОСТ Р 50.1.040.–2002 Статистические методы. Планирование эксперимента. Термины и определения. М., 2002. 78 с.

50. ГОСТ Р 7.0.11 – 2011. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления. М., 2012. 15 с.

51. Грановский Г.И. Износостойкость твердых сплавов и закаленных инструментальных сталей // Трение и износ при резании металлов. М. : Машгиз. 1955. С. 14–31.

52. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука. 1976. 230 с.

53. Гринченко М.И. Метод определения механических остаточных напряжений и его перспективы для создания эталона единицы механического остаточного напряжения // Вестник метролога. №4. 2016. С. 19–23.

54. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных // Пер. с англ. М.: Мир. 1980. 611 с.

55. Джонсон У., Меллор П. Теория пластичности для инженеров. Пер. с англ. / Пер. А. Г. Овчинников. М.: Машиностроение. 1979. 567 с.

56. Дилигенский Н.В., Камаев Ю.П. О теплофизике процесса шлифования //Физика и химия обраб. материалов. № 1. 1969. С. 43–50.

57. Димов Ю.В. Обработка деталей свободным абразивом. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. 293 с.

58. Димов Ю.В. Обработка деталей эластичным инструментом. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 352 с.

59. Димов Ю.В. Обработка деталей эластичным инструментом : Справочник. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2013. 485 с.

60. Димов Ю.В. Температура резания при обработке лепестковыми кругами. // Вестник ИрГТУ. №6 (46). 2010. С. 34–40.
61. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Износ полимерно-абразивных щеток при обработке кромок // Вестник ИрГТУ. №11. 2018. С. 43-55.
62. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Износостойкость эластичных абразивных кругов при обработке деталей // Вестник машиностроения. №1. 2014. С. 48–51.
63. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Инструмент для финишной обработки отверстий // Металлообработка. №4(64). 2011. С. 5–8.
64. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Исследование качества поверхности при скруглении кромок полимерно-абразивными щетками // Вестник ИрГТУ. №9. 2016. С. 23–34.
65. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Исследование производительности процесса скругления кромок полимерно-абразивными щетками // Вестник машиностроения. №3. 2017. С. 74–78.
66. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Исследование характеристик полимерно-абразивных щеток // Вестник ИрГТУ. №4. 2016. С. 19–24.
67. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Круги для финишной обработки деталей // Вестник ИрГТУ. №5. 2011. С. 16–20.
68. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Оптимизация процесса обработки деталей эластичными абразивными кругами // Вестник машиностроения. №8. 2014. С. 65–69.
69. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Производительность и качество при обработке эластичными абразивными кругами // Вестник ИрГТУ. №7. 2012. С. 37–40.
70. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Производительность и качество поверхности при обработке эластичными абразивными кругами // Металлообработка. №4(70). 2012. С. 7–11.
71. Димов Ю.В. Подашев Д.Б. Производительность при скруглении кромок торцовыми полимерно-абразивными щетками // Вестник ИрГТУ. №8. 2017. С. 10–21.
72. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Силы резания при обработке кромок торцовыми щетками // Вестник ИрГТУ. №12. 2017. С. 22–42.
73. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Силы резания при обработке эластичными абразивными кругами // Вестник ИрГТУ. №7. 2015. С. 47–55.
74. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Скругление острых кромок деталей машин полимерно-абразивными щетками // Вестник ИрГТУ. №11. 2012. С. 48–53.
75. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Способ определения параметров режущего микрорельефа эластичного абразивного инструмента. Патент на изобретение. №2561342. опубл. 27.08.2015. бюл. №24.
76. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Съем материала при обработке эластичными абразивными кругами // В сборнике: «Фундаментальные исследования в области технологий двойного назначения». Комсомольск-на-Амуре. 2011. С. 139–142.

77. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Температура в зоне резания при обработке эластичными абразивными кругами // Вестник ИрГТУ. №2. 2015. С. 38–42.
78. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Финишная обработка деталей полимерно-абразивными щетками. В сборнике: «Science and Education. Materials of the III international research and practice conference». Munich. Germany. 2013. P. 91–96.
79. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Шероховатость кромок деталей машин при их скруглении // Вестник машиностроения. №12. 2015. С. 53–55.
80. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Шероховатость поверхности при обработке полимерно-абразивными кругами // Вестник ИрГТУ. №2. 2018. С. 10–25.
81. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Щетка полимерноабразивная для механической обработки деталей. Патент на полезную модель № 91509. опубл. 20.02.2010. Бюл. № 5.
82. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Экспериментальное исследование нормальной и тангенциальной составляющей сил резания при обработке деталей эластичными абразивными кругами // В сборнике: «Science, Technology and Higher Education. Materials of the II international research and practice conference». Westwood. Canada. 2013. P.111–116.
83. Димов Ю.В., Подашев Д.Б., Китов А.К., Чапышев А.П. Установка для обработки кромок на длиномерных деталях типа профилей. Патент на полезную модель. №187637. опубл. 14.03.2019. бюл. №8.
84. Димов Ю.В., Шматкова А.В. Силы резания при обработке лепестковыми кругами // СТИН. 2011. № 7. С. 27.
85. Дмитриев А.Я., Вашуков Ю.А., Митрошкина Т.А. Робастное проектирование и технологическая подготовка производства изделий авиационной техники: учеб. пособие. Самара: Изд-во СГАУ. 2016. 76 с.
86. Дрейпер Н.Р., Смит М. Прикладной регрессионный анализ. М.: Вильямс. 2007. 912 с.
87. Дядя С.И. и др. Обоснование выбора полимерно-абразивного инструмента для выполнения отделочных операций // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. Запорожье: Изд-во Запорожского нац. техн. ун-та. 2010. № 2. С. 145–148.
88. Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. Физические основы процесса шлифования // Саратов: изд-во СГУ, 1978. – 128 с.
89. Ермаков Ю.М., Степанов Ю.С. Современные способы эффективной абразивной обработки // М.: ВНИИТЭМП. 1992.–64 с.
90. Заболеева-Зотова А.В. Введение в системологию: Учеб. Пособие. ВолгГТУ. Волгоград. 1999. 75с.
91. Зверовщиков А.Е. Технологическое обеспечение качества поверхностей деталей при многофункциональной центробежно-планетарной объемной обработке. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Пенза. 2013. 38 с.

92. Зверовщиков В.З., Зверовщиков А.Е., Зверовщиков Е.А. Повышение эффективности объемной центробежной отделочно-упрочняющей обработки деталей в контейнерах с планетарным вращением // Упрочняющие технологии и покрытия. №12. 2007. С. 3–10.
93. Зубаирова Л.Х., Свирщев В.И. Аналитическое описание напряженного состояния детали при плоском торцовом планетарном шлифовании. СТИН, № 7. 2013. С. 14–18.
94. Зубаирова Л.Х., Свирщев В.И. Определение остаточных напряжений от действия силы резания при шлифовании. СТИН, № 2. 2014. С. 35–37.
95. Иванов А.Г. Измерительные приборы в машиностроении. Уч. пособие. М.: Изд-во стандартов. 1981. – 496 с.
96. Иванова А.В. и др. Робототехнический комплекс удаления заусенцев после фрезерования деталей. Вестник ИрГТУ. № 11 (82). 2013. С. 49–53.
97. Иванова А.В. Робототехнический комплекс удаления заусенцев после фрезерования деталей // Вестник Иркутского государственного технического университета. №11. 2013. С. 49–53.
98. Ильющин А.А. Пластичность. Ч. 1. Упруго-пластические деформации / Репр. воспр. текста изд. 1948 г. М.: Логос. 2004. 388 с.
99. Исследование режущих кромок шлифовального круга // Труды американского общества инженеров-механиков. Сер. В. 1964. № 4. Г. 86. С. 80–92.
100. Заявка 59-24966. Япония, МКИ В 24 Д 13/14 / Мураками Масаюки. Опубл. 08.06.84. // Изобретения стран мира. 1985. Бюл. № 12.
101. Караваев Д.М., Безматерных В.К., Москалев В.А. Оборудование для измерения механических свойств методом царапания // Master's journal. №1. 2013. С. 155–159.
102. Карташов И.Н. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах // Киев: Высшая школа. 1975. 188 с.
103. Козлов А.А., Козлов А.М., Василенко Ю.В. Моделирование обработанной поверхности при шлифовании некруговым торцовым абразивным инструментом // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2016. Т. 16. № 3. С. 54-62.
104. Козлов А.М., Ефремов В.В. Формирование микрорельефа при обработке абразивным инструментом // Известия машиностроительных вузов. 2004. № 1. С. 59–64.
105. Козулько Н. В., Семиниченко К. В. Параметры шероховатости поверхностей стеклопластиковых деталей, обработанных лепестковыми кругами различной зернистости под операцию склеивание // Высокие технологии и модернизация экономики: достижения и новые векторы развития. Сборник научных трудов по материалам I Международной научно-практической конференции, г. Екатеринбург. 2017. С. 309–311.
106. Козулько Н. В., Семиниченко К. В. Влияние зернистости лепесткового шлифовального круга на формирование шероховатости поверхности деталей из стеклопластика под операцию «склеивание» // В сборнике: Проблемы и перспективы студенческой науки. г. Новокузнецк. №1. 2017. С.21–23.

107. Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Козырева М.В. Анализ зависимостей съема и шероховатости поверхности детали при обработке лепестковыми кругами по результатам факторного эксперимента. Вестник ИрГТУ. № 1 (96). 2015. С. 32–41.
108. Компания «Астра»: [электронный ресурс]. URL: <http://www.astra-2.ru/profshlif.1.html/> (дата обращения 20.12.2017).
109. Компания «Элемент»: [электронный ресурс]. URL: <http://www.element-msc.ru/katalog/oborudovanie-dlya-analiza-poverhnosti/rastrovye-elektronnye-mikroskopy-jeol/JIB-4501-Multibeam> (дата обращения 06.01.2019).
110. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке // Саратов: Саратовский университет. 1975. 212 с.
111. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М. : Машиностроение, 1974. 280 с.
112. Кравченко Ю.Г., Савченко Ю.В. Расчет параметров исходного рельефа режущей поверхности абразивных инструментов // Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении : труды 2 Междунар. науч.-техн. конф. (Резниковские чтения). Тольятти, 2008. Ч. 1. С. 124–127.
113. Крагельский И.В. Трение и износ. М. : Машиностроение, 1968. 480 с.
114. Крагельский И.В., Харач Г.М. О расчете износа поверхностей трения // Расчетные методы и оценки трения и износа. г. Брянск. 1975. С. 5–17.
115. Кризберг Ю.Я., Рудзит Я.А. Определение кривизны вершин микронеровностей шероховатых поверхностей // Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин. Вып. 7. 1979. С. 79-87.
116. Кроха В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. М.: Машиностроение. 1980. 157 с.
117. Кузнецов В.Д., Лоскутов А.И., Коган Ю.И. Влияние смазок на процесс царапания металлом // Известия вузов. Физика. 1957. № 1. С. 32–35.
118. Кулаков Ю.М., Хрульков В.А. Отделочно-зачистная обработка деталей. М.: Машиностроение. 1979. 216 с.
119. Кургузов Ю.И. Анализ контактного взаимодействия вращающейся щетки с обрабатываемой поверхностью // Известия самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. № 4 (3). С. 794–798.
120. Кургузов Ю.И., Папшев Д.Д. Технологическое обеспечение качества поверхности при упрочнении механическими щетками // Вестник машиностроения. 1986. №4. С. 54–58.
121. Кургузов Ю.И., Кургузов М.Ю. Упрочнение кромок лопаток рабочих колес газотурбинных двигателей // Вестник СамГТУ. 2010. № 4 (27). С. 120–127.
122. Кургузов Ю.И., Сундуков Д.Ю. Моделирование процесса обработки механическими щетками // Материалы Всеросс. науч.-техн. интернет-конф. с междунар. участием «Высокие



технологии в машиностроении». 20–23 окт. 2009 г. Самара. 2009. С. 31–34.

123. Лепеш А.Г. Прогнозирование изнашивания щеток коммунальных машин // Технико-технологические проблемы сервиса: научн.-техн. журнал. 2010. № 2 (12). С. 25–34.

124. Лепеш А.Г., Лепеш Г.В., Воронцов И.И. Методика экспериментального определения износостойкости щеточного ворса коммунальной уборочной техники // Технико-технологические проблемы сервиса: научн.-техн. журнал. 2011. № 2 (16). С. 7–19.

125. Лепеш А.Г. Имитационное моделирование рабочего процесса коммунальной уборочной техники // Технико-технологические проблемы сервиса: научн.-техн. журнал. 2011. № 3 (17). С. 32–41.

126. Лищенко Н.В., Ларшин В.П. Температура при шлифовании прерывистыми и высокопористыми кругами // Вектор науки ТГУ. №3–1(33–1). 2015. С. 75–84.

127. Лукин Л.Н., Лукин Н.Н. Расстояние между зернами на рабочей поверхности алмазных брусков // Сб. науч. тр. Барнаул. 1973. С. 30 – 41.

128. Лукьянов В.С., Рудзит Я.А. Параметры шероховатости поверхности. М.: Изд-во стандартов. 1979. 162 с.

129. Макаров В.Ф., Виноградов А.В. Измерение профиля скругленных кромок образцов при исследовании обработки кромок дисков ГТД абразивно-полимерными щетками // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2010. Том 12, № 2. С. 106–115.

130. Макаров В.Ф., Половинкин А.Х. Оценка напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя детали при ультразвуковой упрочняющей финишной обработке деталей ГТД // Упрочняющие технологии и покрытия. №5. 2008. С. 49–52.

131. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов. М.: Машиностроение. 1968. 400 с.

132. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М. : Машиностроение. 1974. 319 с.

133. Мартынов А.Н. Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та. 1981. 212 с.

134. Марченко Е.А. О природе разрушения поверхности металлов при трении. М.: Наука, 1979. 118 с.

135. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. – Киев: Техника. 1971. 144 с.

136. Материалы в машиностроении. Выбор и применение. Т.1. Цветные металлы и сплавы. / Под ред. Л.П. Лужникова. М.: Изд-во Машиностроение. 1987. 304 с.

137. Мачишин Г.М. Определение рациональной области применения полимерно-абразивного инструмента // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2014. Вып. 65–66. С. 117–122.

138. Машиностроение. Энциклопедия в 40 томах. Главный редактор академик РАН К.В. Фролов. М.: Изд-во «Машиностроение». 1994-2013 гг.
139. Международный концерн Кука: [электронный ресурс], <https://www.kuka.com> (дата обращения 20.12.2017).
140. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: Математические основы. // М.: Мир. 1978. 312 с.
141. Микроскоп Микромед МЕТ-2: [электронный ресурс]. URL: <https://micromed-spb.ru/products/metallograficheskie-mikroskopy/mikroskop-mikromed-met-2/> (дата обращения 06.01.2019).
142. Микроскоп универсальный измерительный УИМ-21. Руководство по эксплуатации. 53 с.
143. Михайлов В.Е. и др. Технология финишной обработки, качество поверхностного слоя и прочностные свойства лопаток паровых и газовых турбин. Тяжелое машиностроение. №5. 2015. С. 7–10.
144. Модульная балансировочная техника Tool Dynamic: [электронный ресурс]. URL: <https://www.haimer.ru/produkcija/balansirovochnaja-tehnika.html> (дата обращения 01.03.2018).
145. Музыкин С.Н., Родионова Ю.М. Системный анализ: учебное пособие. М.: МГАПИ, 2003. 199 с.
146. Научно-образовательная литература: [электронный ресурс]. URL: <http://libraryno.ru/> (дата обращения 04.02.2018).
147. Никитин С.П., Ханов А.М., Сиротенко Л. Д., Трофимов Е.О., Матыгуллина Е.В. Расчет теплового сопротивления элементов зоны резания при шлифовании теплозащитных покрытий // Современные проблемы науки и образования. № 6. 2014. (Электронный ресурс): URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15981> (дата обращения: 22.03.2019).
148. Николаенко А.А. Моделирование сил резания при шлифовании с учетом характеристик круга // Прогрессивные технологии в машиностроении: темат. сб. науч. тр. Челябинск. 2003. С. 50–53.
149. Николаенко А.А. Определение радиальной составляющей силы резания при плоском глубинном шлифовании // Прогрессивные технологии в машиностроении: темат. сб. науч. тр. Челябинск. 2003. – С. 154.
150. Новоселов Ю.К. Динамика формирования поверхностей при абразивной обработке // Севастополь: Из-во СевНТУ. 2012. 304 с.
151. Новоселов Ю.К., Братан С.М. Моделирования процессов взаимодействия шлифовального круга и заготовки при чистовом шлифовании. Вісник СевНТУ. № 118. 2011. С. 92-106.
152. ОАО НПК «Абразивы и шлифование»: [электронный ресурс]. URL: <http://www.abrasiv.ru/>. (дата обращения 20.12.2017).

153. Овсеев А.Н., Клауч Д.Н. Современные проблемы, связанные с технологическими остаточными напряжениями // Упрочняющие технологии и покрытия. №6. 2010. С. 8–12.
154. Онищенко Я.Я. Вычисление твердости по результатам испытаний на микротвердость // Новое в области испытаний на микротвердость. М.: Наука. 1974. С. 143–150.
155. ООО Мегапром: [электронный ресурс]. URL: <http://megapromspt.ru/> (дата обращения 20.12.2017).
156. Определение остаточных напряжений: [электронный ресурс]. URL: <http://specural.com/articles/category/15/message/888/> (дата обращения 04.02.2018).
157. Осборн. Промышленные щетки: [электронный ресурс]. URL: <http://www.osborn-rus.ru/production/111/356/>. (дата обращения 20.12.2017).
158. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та. 1981. 144 с.
159. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. М.: Изд-во Наука. 1977. 224 с.
160. Паньков Л.А., Костин Н.В. Обработка инструментами из шлифовальной шкурки. Л.: Машиностроение. 1988. № 12.
161. Патент РФ №1443304. Связка для гибкого абразивного инструмента. МКИ<sup>5</sup> В24 D 3/34 / Гудков А.Н. и др. Оpubл. 30.10.1994.
162. Патент РФ №2009865. Лепестковый абразивный круг. МПК: 5В 24D 13/00 А / Бурочкин Ю.П., Крутов С.Н., Кожевникова Т.В. Оpubл. 30.03.1994.
163. Патент РФ №2028917. Абразивный лепестковый круг. МПК: 6В 24D 13/00 А / Хилько И.И. Оpubл. 20.02.1995.
164. Патент РФ №2028918. Лепестковый абразивный круг. МПК: 6В 24D 13/04 А / Ермаков Ю.М., Ермаков А.Ю. Оpubл. 20.02.1995.
165. Патент РФ №2032525. Лепестковый абразивный круг. МПК: 6В 24D 13/04 А / Гончаров В.М., Васин Г.И. Оpubл. 10.04.1995.
166. Патент РФ №2042495. Устройство для крепления шлифовального круга. С1 В 24В 45/00. / Степанов Ю.С., Афанасьев Б.И., Алексеев В.В. Оpubл. 10.04.1995.
167. Патент РФ №2147507. Сборный лепестковый круг. МПК: В24D13/04/ Ушанев О.Н., Приданникова Л.В. Оpubл. 20.04.2000.
168. Патент РФ №2188753. Лепестковый круг. МПК: В24D13/00/ Усов В.П. и др. Оpubл. 10.09.2002.
169. Патент РФ № 2241591. Лепестковый полировальный круг. МПК: В24D13/04/ Степанов Ю.С. и др. Оpubл. 10.12.2004.
170. Патент США №5211725А. Method for manufacturing abrasively-tipped flexible bristles, and flexible abrasive hones therefrom. МКИ<sup>5</sup> В24 D 3/00 / Robert G. Fowlie, Tara L. Rands. // РЖ Технология машиностроения. Оpubл. 18.05.1993.

171. Патент США №5257480А. Batting wheel and vanes for the same. МКИ<sup>5</sup> В24 С 5/06/ James H. Carpenter. // РЖ Технология машиностроения. Оpubл. 02.11.1993.
172. Патент США №6152814А. Expandable abrasive belt for use with inflatable tool. МПК<sup>7</sup> В24 D 11/00/ Robert P. Amarosa, Sr. Peter J. Amarosa // РЖ Технология машиностроения. Оpubл. 28.11.2000.
173. Петросов В.В. Гидродробетруйное упрочнение деталей и инструмента. М. : Машиностроение. 1977. 166 с.
174. Пини Б.Е., Крылов О.В., Хачикян Е.А. Абразивно-полимерные инструменты для механической обработки деталей. // Машиностроение и инженерное образование. г. Москва. 2016. № 2 (47). С. 18–23.
175. Пини Б.Е., Яковлев Д.Р. Абразивно-полимерная щетка. Патент на полезную модель. №122259. Оpubл.: 09.04.2012.
176. Пини Б.Е., Яковлев Д.Р. О некоторых технологических возможностях щеток с абразивно-полимерным волокном // Известия МГТУ «МАМИ». 2009. № 1 (7). С. 148–151.
177. Пини Б.Е., Яковлев Д.Р., Солоницын Б.М. Щеточный инструмент. // Грузовик. №1. 2008. С. 19–24.
178. Подашев Д.Б. Исследование характеристик эластичных абразивных кругов. В сборнике: «III тысячелетие – новый мир. Труды международного форума по проблемам науки, техники и образования». Москва. 2012. С. 93–94.
179. Подашев Д.Б., Маркгейм Ю.В. Эластичный абразивный инструмент для финишной обработки деталей // В сборнике статей «V Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири». г. Иркутск. 16–18 апреля 2015. С. 117–125.
180. Подашев Д.Б. Оптимизация скругления острых кромок деталей эластичными полимерно-абразивными щетками // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018617430 от 25.06.2018 г.
181. Подашев Д.Б. Оптимизация финишной обработки деталей эластичным абразивным инструментом // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014613558 от 28.03.2014 г.
182. Подашев Д.Б. Полимерно-абразивные инструменты для финишной обработки деталей // В сборнике: «IX Всероссийская научно-практическая конференция «Авиамашиностроение и транспорт Сибири». г. Иркутск. 12–15 апреля 2017. С. 220–225.
183. Подашев Д.Б. Скругление острых кромок деталей машин полимерно-абразивной щеткой // В сборнике: «Машины, агрегаты и процессы: проектирование, создание и модернизация». г. Санкт-Петербург. 2018. С. 59–61.
184. Подашев Д.Б. Скругление острых кромок деталей эластичным абразивным инструментом // В сборнике: «Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы, ре-

шения. Международная научно-техническая конференция: материалы и доклады». Комсомольск-на-Амуре. 2013. С. 66–74.

185. Подашев Д.Б. Съём материала при обработке эластичными абразивными кругами // В сборнике: «Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении». г. Тюмень. 2012. С.78–82.

186. Подашев Д.Б. Финишная обработка деталей эластичными полимерно-абразивными инструментами. Монография. Иркутск: Изд-во ИРННТУ. 2018. 246 с.

187. Покинтелица Н.И., Левченко Е.А., Кравченко О.С. Теплообразование и температура в зоне резания при высокоскоростной обработке сталей режущим диском // Известия ТулГУ. Технические науки. №8. Ч.2. 2017. С. 159-168.

188. Полканов Е.Г., Пини Б.Е. Шлифование инструментальных материалов высокопористыми абразивными кругами // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. №2. 2010. С.135–141.

189. Попов В.С. Исследование изнашивания легированных сплавов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора техн. наук // М. 1973. 41 с.

190. Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. М. : Машиностроение. 1977. 263 с.

191. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин // Киев: Техника. 1989. 279 с.

192. Проволоцкий А.Е., Мохеб Моххамед. Обработка свободным зерном со шлифованием // Прогрессивные технологии и системы машиностроения (г. Донецк). №1(39). 2010. С. 161–166.

193. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. Использование полимераабразивного эластичного инструмента на операциях чистовой обработки // Вестник харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2006. № 33. С.106–108.

194. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л., Старостин Д.А. Повышение производительности процесса обработки полимер-абразивными инструментами. Прогрессивные технологии и системы машиностроения (г. Донецк). №1(32), 2006. С. 193–199.

195. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. Технологические возможности шлифования полимераабразивными кругами // Научно-технические проблемы станкостроения, производства технологической оснастки и инструмента: Материалы междунар. науч.-техн. конф. Одесса–Киев, 2002. С. 102–104.

196. Продукция Lippert-Unipol: [электронный ресурс]. URL: <http://www.lippertunipol.ru> (дата обращения: 10.12.2013).

197. Протодяконов М.М., Тедер Р.И. Методика рационального планирования экспериментов. М.: Наука. 1970. 76 с.

198. Пузанов В.В., Каракулова М.Л. Геометрия абразивного зерна в круге и некоторые вопросы формообразования обработанной поверхности при глубинном шлифовании // Совер-

шенствование процессов резания и повышение точности металлорежущих станков. Ижевск, 1973. С. 3–17.

199. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М.: Наука. 1968. 288 с.

200. Редько С.Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов // Саратов: изд-во СГУ, 1962. – 231 с.

201. Резников Н.А. Теплофизика процессов механической обработки металлов. М.: Машиностроение. 1981. 279 с.

202. РМЦ Калиброн. Большой инструментальный микроскоп с цифровым отсчетным устройством БМИ 1Ц: [электронный ресурс]. URL: <http://calibronrmc.ru/lo/mikroskopy/bmi-1ts> (дата обращения 20.11.2018).

203. Рудзит Я.И. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. Рига : Зинатне. 1975. 210 с.

204. Руди Д.Ю., Попова М.В., Петров С.И. Грубая погрешность и критерии их исключения // В сборнике: «Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии»: сб. докл. 5-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках специализир. форума «Expo Build Russia» (Екатеринбург, 14 апреля 2016 г.). Екатеринбург : Издательство УМЦ УПИ. 2016. С. 179–181.

205. Савенко В.Я., Качанова Л.А., Щукин Е.Д. О нижней границе применимости метода микротвердости // Новое в области испытаний на микротвердость. 1974. С. 67–71.

206. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций . М.: Наука. 1963. 463 с.

207. Свирщев В.И., Подборнов И.В. Зубаирова Л.Х., Тепловой баланс при плоском торцовом планетарном шлифовании. Ижевск: Вестник ИжГТУ. №1 (49). 2011. С.11–13.

208. Сидорова А.В. Модель управления точностью обработки на операции фрезерования кромок на РТК // В сборнике: «Авиамашиностроение и транспорт Сибири». Сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции. Иркутский национальный исследовательский технический университет. 2017. С. 246–250.

209. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение. 1978. 167 с.

210. Соколовский В.В. Теория пластичности. Гос. изд. техн.-теор. лит. М., Л. 1950. 396 с.

211. Спецтехноресурс: [электронный ресурс]. URL: <http://laborant.ru/measur/sostav/optic/> (дата обращения 05.07.2018).

212. Справочник металлиста / под. Ред. С.А. Чернавского. Т. 2. М. : Гос. и научн.-техн. изд-во машиностр. лит-ры. 1958. 975 с.

213. Справочник по производственному контролю в машиностроении. Издание третье, перераб. и доп. // Под ред. доктора техн. наук, профессора А.К. Кутая. Л.: Машиностроение. 1974. 676 с.

214. Справочник технолога машиностроения: в 2-х томах / под. ред. А.Н. Малова. Изд. 3, перераб. Т. 2. М.: Машиностроение. 1972. 568 с.
215. Станкомаш: [электронный ресурс]. URL: <http://www.stankomasch.ru/catalog/product/14753/> (дата обращения 05.07.2018).
216. Степанов Д.Н. Влияние параметров полимерно-абразивного инструмента и режимов обработки на шероховатость поверхности титанового сплава ВТ8-М // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. Запорозьке. 2012. № 2. С. 87–90.
217. Судариков А.С., Якимов А.В., Кудашкин В.Н. Расчет температурного поля при прерывистом шлифовании // Повышение надежности и долговечности изделий машиностроения: тезисы докладов конф. Пермь: ППИ. 1972. С.53–60.
218. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей // М.: Машиностроение. 1987. 208 с.
219. Суслов А.Г. Технология машиностроения // Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. М.: Машиностроение. 2004. 400 с.
220. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения // М.: Машиностроение. 2002. 684 с.
221. Суслов А.Г., Бишутин С.Г. Математическая модель шероховатости шлифованной поверхности // Справочник. Инженерный журнал. №8. 2004. С.17-20.
222. Тамаркин М.А., Бабичев И.А., Пичко Ю.А. Методика испытаний эксплуатационных показателей абразивных сред для вибрационной обработки // Вопросы вибрационной технологии: Межвузовский сборник. Ростов-на-Дону. 1991. С.28-31.
223. Тамаркин М.А., Козулько Н.В., Верченко А.В. Механизация процесса абразивной обработки деталей из композитных материалов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. г. Рыбинск. №2 (41). 2017. С. 75–82.
224. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Рожненко О.А. Исследование формирования съема материала при абразивной обработке фасонных поверхностей деталей // СТИН. №10. 2012. С.25–30.
225. Тамаркин М.А., Шевцов С.Н., Самодумский Ю.М. Расчет параметров шероховатости поверхности при вибрационной обработке // Отделочно-упрочняющая механическая обработка, качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин: сборник статей. Ростов-на-Дону. 1977. С.28-30.
226. Тепловизионная съемка как инструмент оценки энергосберегающего потенциала: [электронный ресурс]. URL: [http://www.energsovet.ru/bul\\_stat.php?idd=24](http://www.energsovet.ru/bul_stat.php?idd=24) (дата обращения 01.03.2018).
227. Тепловизор FLIR Orion SC7000-series. [электронный ресурс]. URL: [https://www.pergam.ru/catalog/thermal\\_imagers/scientific\\_cooled/Тепловизор\\_SC7000series.htm](https://www.pergam.ru/catalog/thermal_imagers/scientific_cooled/Тепловизор_SC7000series.htm) (дата обращения 01.03.2018).

228. Технологии обработки металлов: [электронный ресурс]. URL: <https://www.metalcutting.ru/> (дата обращения 04.02.2018).
229. Технологические остаточные напряжения. // под ред. д-ра техн. наук., проф. Подзья А.В. М.: Машиностроение. 1973. 216 с.
230. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости / под ред. Шапиро Г.С. 2-е изд. М.: Наука. 1979. 560 с.
231. Тихонов А.А., Тихонов А.А., Гришин Д.И. Скругление острых кромок деталей при гидроабразивной обработке. // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. г. Пермь. 2016. Т.1. С. 86–90.
232. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов. М. : Наука. 1970. 392 с.
233. ТКЦ-центр: [электронный ресурс]. URL: <http://www.tkzentrum.ru/equipment/ernst/item48/item99/> (дата обращения 20.12.2017).
234. ТНК – Berg Ub (официальный дистрибьютор): [электронный ресурс]. URL: <http://www.thk.ru> (дата обращения 05.07.2018).
235. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. М.: Металлургия. 1972. 408 с.
236. Трошин Ф.В. Некоторые особенности применения щеток из полимерно-абразивного ворса // Автомобильная промышленность. №8. 2008. С.35.
237. Усеинов А.С., Усеинов С.С. Измерение механических свойств методом царапания // Наноиндустрия. №6. 2010. С. 28–33.
238. Устинович Д.Ф., Голуб В.М. Моделирование тепловых процессов при обработке плоских поверхностей полимерно-абразивными щетками. // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. №4. 2012. С.63–68.
239. Устинович Д.Ф., Голуб В.М. Моделирование тепловых процессов при обработке тел вращения полимерно-абразивными щетками. // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. №2. 2011. С.62–68.
240. Устинович Д.Ф., Голуб В.М. Управление тепловыми режимами при обработке плоских поверхностей дисковыми полимерно-абразивными щетками. // Вестник полоцкого государственного университета. Серия В: промышленность. Прикладные науки. №3. 2012. С.90–94.
241. Устинович Д.Ф., Голуб В.М. Управление тепловыми режимами при шлифовании валов дисковыми щетками. // Механика машин, механизмов и материалов. г. Минск. № 3(16). 2011. С.38–42.
242. Устинович Д.Ф., Прибыльский В.И. Зависимости мощности от режимов шлифования полимерно-абразивными дисковыми щетками. // Механика машин, механизмов и материалов. г. Минск. № 1(18). 2012. С.75–79.



243. Устинович Д.Ф. Экспериментальное исследование качества плоских поверхностей при обработке дисковыми абразивными щетками. // Вестник полоцкого государственного университета. Серия В: промышленность. Прикладные науки. №8. 2009. С.130–134.

244. Утенков В.М., Быков П.А. Возможности использования динамометра Kistler для испытания металлорежущих станков. // Инженерный вестник: электронный научн.-техн. журнал. 2012. № 10. URL : <http://engbul.bmstu.ru/> (дата обращения: 05.11.2014).

245. ФГБОУ ВО ИРНИТУ. Научно-исследовательская лаборатория сверхпроводимости: [электронный ресурс]. URL: <https://www.istu.edu/structure/54/11512/2682/?&c&&c&lang=cng> (дата обращения 06.01.2019).

246. ФГБОУ ВО ИРНИТУ. Научно-исследовательская лаборатория технологии высокопроизводительной механообработки, формообразования и упрочнения деталей машин: [электронный ресурс]. URL: [https://www.istu.edu/ob\\_irnitu/struktura/nauka/nil/nil\\_tekh\\_vysokoproizv\\_mekhanoobrabotki/oborudovanie/](https://www.istu.edu/ob_irnitu/struktura/nauka/nil/nil_tekh_vysokoproizv_mekhanoobrabotki/oborudovanie/) (дата обращения 20.11.2018).

247. Федотов Е.В., Савин И.Г. Математическая модель поверхности абразивного инструмента при шлифовании // 11 Регион. конф. молодых исследователей Волгоградской области, Волгоград, 8–10 нояб., 2006 : тез. докл. Направление 1-5. г. Волгоград. 2007. С. 70–71.

248. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение. 1979. 248 с.

249. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов. Л.: Машиностроение. 1973. 133 с.

250. Фокин В.Г., Дмитриев В.А. Определение методом конечных элементов дополнительных остаточных напряжений при разрезке деталей. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. №1(18). 2009. С. 95–100.

251. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. Пер. с англ. М.: Мир. 1967. 406 с.

252. Худобин Л.В. Смазочно-охлаждающие средства, применяемые при шлифовании. М.: Машиностроение. 1971. 214 с.

253. Хусаинов А.Ш. Повышение эффективности операций и заготовок тонкостенных деталей путем снижения теплонапряженности процесса обработки // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата техн. наук. Ульяновск, 1996. – 18 с.

254. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхности. Теоретико-вероятностный подход. М.: Наука. 1975. 344 с.

255. Чапышев А.П., Иванова А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей с применением автоматических стационарных установок // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Самара. 2014. Т. 16. № 1 (5). С. 1627–1634.

256. Чапышев А.П., Иванова А.В., Крючкин А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара, 2013. Т. 15. № 6 (2). С. 533–537.

257. Чапышев А.П., Стародубцева Д.А. Программный модуль назначения режимов финишной обработки с применением автоматических щеточных стационарных установок // Вестник пермского нац. исследовательского политехн. ун-та. Машиностроение, материаловедение. Пермь. 2016. Т. 18. № 2. С. 21–37.
258. Чудаков Е.А. Качение автомобильного колеса. М. : АН СССР. 1948. 200 с.
259. Шальнов В.А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов. М. : Машиностроение. 1972. 242 с.
260. Щеголев В.А., Уланова М.Е. Эластичные абразивные и алмазные инструменты (теория, конструкции, применение). Л.: Машиностроение. 1977. 184 с.
261. Шлифовальные инструменты, материалы, оборудование, технологии: [электронный ресурс]. URL: <http://www.shkurka.ru> (дата обращения: 10.12.2013).
262. Шматкова А.В. Оптимизация процесса обработки деталей периферией плоского лепесткового круга // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата техн. наук. Иркутск. 2006. – 20 с.
263. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. М.: Машиностроение. 1975. 175 с.
264. Якимов А.В., Слободяник П.Т., Усов А.В. Теплофизика механической обработки. Киев: Лыбидь. 1991. 240 с.
265. Якимов А.В., Ткаченко Б.О., Зимин С.Г. Основы теории тепловых явлений при шлифовании деталей машин. Одесса: ОГПУ. 1997. 272 с.
266. Яковлев Д.Р., Пини Б.Е. О взаимодействии волокна абразивно-полимерных щеток с обрабатываемой поверхностью // Известия МГТУ «МАМИ». 2009. № 2 (8). С. 184–187.
267. Ящерицын П.И., Зайцев А.Г. Повышение качества шлифовальных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента. Минск : Наука и техника. 1972. 475 с.
268. Ящерицын П.И., Мартынов А.Н., Гридин А.Д. Финишная обработка деталей уплотненным потоком свободного абразива. Минск : Наука и техника. 1978. 224 с.
269. Ящерицын П.И., Махаринский Е.И. Планирование эксперимента в машиностроении. Минск: Выш. шк.. 1985. 286 с.
270. 3M. Абразивные материалы и инструменты: [электронный ресурс]. URL: <http://www.3mabrasives.ru/> (дата обращения: 18.07.2017).
271. Abrasive Nylon Fiber Deburring Technology - Abtex Corporation: [электронный ресурс]. URL: <http://www.abtex.com/index.html> (дата обращения 20.12.2017).
272. Altintas Y., Jin X. Mechanics of Micro-Milling with Round Edge Tools. // CIRP Annals - Manuf. Tech.. 2011. Vol. 60. P. 77–80.
273. Bruker: [электронный ресурс]. URL: <https://www.bruker.com/> (дата обращения 01.03.2018).
274. Brush Research Manufacturing: [электронный ресурс]. URL: <http://www.brushresearch.com/> (дата обращения 20.12.2017).

275. CDMC - Cleveland Deburring Machine Company: [электронный ресурс]. URL: <http://cdmcmachine.com/> (дата обращения 20.12.2017).
276. Chiu N. Computer Simulation for form grinding process // Ph. D. Thesis, University of Massachusetts. 1993.
277. Choi H.Z., Lee S.W., Choi Y.J., Kim G.H., Ko S.L. Micro deburring technology using ultrasonic vibration with abrasive [электронный ресурс] // Laboratory for Manufacturing Automation University of California, Berkeley. Research Reports 2003/04 May. 2004. P. 37–43. URL : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.110.8373&rep=repl&type=pdf> (дата обращения: 12.03.2016).
278. Dennis E. Briggs, Samantha Echaves, Brendan Pidgeon, Nathan Travis, Jonathan D. Ellis // Effects of varying machine stiffness and contact area in UltraForm Finishing. Proc. SPIE 8884, Optifab 2013. 888405 (15 October 2013).
279. Dimov Yu.V., Podashev D.B. Edge forces in machining by abrasive brushes // Russian Engineering Research. Vol. 37. №2. 2017. P. 117–121.
280. Dimov Yu. V., Podashev D.B. Efficient Machining by Elastic Abrasive Wheels // Russian Engineering Research. Vol. 37. №7. 2017. P. 655–659.
281. Dimov Yu. V., Podashev D.B. Machining forces exerted by an Elastic Abrasive Wheel // Russian Engineering Research. vol. 38. №12. 2018. P. 932-937.
282. Dimov Y., Podashev D. Optimization of edge rounding with elastic abrasive tools // International Journal of Engineering and Technology (IJET). Vol. 7. №6. Dec 2015-Jan 2016. P. 2001–2007.
283. Dimov Yu. V., Podashev D.B. Properties of Elastic Abrasive Wheels // Russian Engineering Research. Vol. 37. №7. 2017. P. 631–637.
284. Dimov Yu.V., Podashev D.B. Rounding the sharp edges of machine parts by means of elastic abrasive tools // Russian Engineering Research. Vol. 33. №11. 2013. P. 632–638.
285. Dimov Yu. V., Shmatkova A.V. Interaction of Lobed Wheel with Machined Surface // Russian Engineering Research. № 7. 2011. P. 707–711.
286. Dornfeld D. Burr formation, burr minimization and deburring seminar: CRIAQ MANU-409C Automated deburring and part finishing Ecole de technologie superieure (ETS): [электронный ресурс]. 2009. URL : <http://www.intechopen.com/books/references/light-metal-alloys-applications/machining-burrs-formation-deburring-of-aluminium-alloys> (дата обращения: 12.03.2016).
287. Dyakonov A.A. Blank-Cutter Interaction in High-Speed Cutting. // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34(12). P. 775–777.
288. Dyakonov A.A. Capabilities of Internal-Grinding Wheels // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34(12). P. 781–784.

289. Dyakonov A.A, Shipulin L.V. Selecting the Cutting Conditions tor Plane Grinding by the Wheel Periphery // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34 (12). P. 814–816.
290. Eisenblaetter.ru – высокие технологии шлифования и полирования: [электронный ресурс]. URL: <http://www.eisenblaetter.ru> (дата обращения: 10.12.2013).
291. Eskandari B., Davoodi B., Ghorbani H. Multi-objective optimization of parameters in turning of N-155 iron-nickel-base superalloy using gray relational analysis // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. Volume 40. Issue 4. 1 April 2018. Номер статьи 233.
292. EXCELTIP. Блог о программе Microsoft Excel: приемы, хитрости, секреты, трюки: [электронный ресурс]. URL: <http://exceltip.ru/> (дата обращения: 06.06.2018).
293. Ficerp. Steel thinking: [электронный ресурс]. URL: <http://www.ficerp.co.uk/> (дата обращения 20.12.2017).
294. Filtero: [электронный ресурс]. URL: <https://filtero.ru/product/shlang-filtero-fft-01/> (дата обращения 05.07.2018).
295. Fladder: [электронный ресурс]. URL: <http://www.fladder.dk> (дата обращения 20.12.2017).
296. Frane J.T. Craftsman's Illustrated Dictionary of Construction Terms, Craftsman Book Company. 1994.
297. Frees E.W. Regression modeling with actuarial and financial applications // New–York.: Cambridge University Press. 2010. 565 p.
298. Hilzinger-thum: [электронный ресурс]. URL: <http://www.hilzinger-thum.de/> (дата обращения 20.12.2017).
299. Hiwin: motion control & systems: [электронный ресурс]: URL: <https://www.hiwin.cz/ru> (дата обращения 05.07.2018).
300. Hoffman Group: [электронный ресурс]. URL: <https://www.hoffmann-group.com> (дата обращения 20.12.2017).
301. Hommel Hercules Werkzeughandel: [электронный ресурс]. URL: <https://www.hhw.de/en/Shop> (дата обращения 25.06.2018).
302. Huang X., Zhou Z., Jun Y., Xia Q. Analysis of influence factors for white layer in grinding of harden steel // Key Engineering Materials. Vol 416. 2009. P. 535–539.
303. Huang X., Zhou Z., Li W. Experimental Investigation of White Layer in Grinding of AISI 52100 Annealed Steel // Key Engineering Materials. Vol 487. 2011. P. 63–69.
304. Hegeman J.B. Fundamentals of grinding: surface conditions of ground materials // Rijksuniversiteit Groningen. 2000. 142 p.
305. Inasaki I. Grinding Process Simulation Based on the Wheel Topography Measuremen // Annals of the CIRP. 1996. Vol. 45(1). P. 347–350.
306. Ivanova A.V., Belomestnykh A.S., Semenov E.Yu., Ponomarev B.B. Manufacturing ca-

pability of the robotic complex machining edge details. // International Journal of Engineering and Technology. 2015. T.7. № 5. P. 1774–1780.

307. Jain V.K., Adsul S.G. Experimental investigations into abrasive flow machining (AFM) // International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 40. 2000. P. 1003–1021.

308. Jen T.C., Lavine A.S. A variable heat flux model of heat transfer in grinding with boiling // Journal of Heat Transfer. 1996. Vol. 1.

309. Kennedy C.W., Hoffman E.G., Bond S.D. Inspection and Gaging. Industrial Press Inc., 1987.

310. Komanduri R., Lucca D.A., Tani Y. Technological advances in fine abrasive processes // CIRP Annals - Manufacturing Technology. Volume 46. Issue 2. 1997. P. 545–596.

311. Kozlov A.M., Efremov V.V. Formation of Micro Relief When Handling Abrasive Tool. // Proceedings of the universities. Mechanical Engineering. 2004. Vol. 1. P. 59–64. (in Russ.)

312. Lancaster J.K. Abrasive wear of polymers // Wear. Vol 14. 1969. P. 223–239.

313. Li N., Ding J., Hu L., Wang X, Lu L., Huang G. Preparation, microstructure and compressive properties of silicone gel/SiC composites for elastic abrasive // Advanced composites letters. Volume 27. Issue 3. 2018. P. 122–128.

314. Li Q.-X., Ma Z., Jiang B., Yao Y.-S. Edge effect modeling of small tool polishing in planetary movement // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Volume 10710. 2018. Номер статьи 1071030. Young Scientists Forum 2017. Shanghai. China. 24–26 November 2017. Код 135497.

315. Lissmac. Uns Bewegen ideen: [электронный ресурс]. URL: <https://www.lissmac.com/ru/metal-processing/products/> (дата обращения 20.12.2017).

316. Malkin S. Anderson R. Thermal aspects of grinding. Part 1 - energy partition // ASME Journal of Engineering for industry. Vol. 96. 1974. P. 1177 – 1183.

317. Mark Fultz D. Abrasive filament brush deburring of powdered metal components [электронный ресурс]. URL: <http://www.abtex.com/pdf/abfildeb.pdf> (дата обращения: 12.03.2016).

318. Mizumoto Yoshio, Asakawa Naoki, Takeuchi Yoshimi (University of Electro-Communications, Dept. of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, Chofu, Tokyo, Japan. P. 182-185.

319. Nadolny K., Balasz B. Modeling and Simulation of Single-Pass Internal Cylindrical Grinding Process // Archives of mechanical Technology and Automation. 2006. Vol. 26(2). P. 67–76.

320. Niknam S.A., Songmene V. Deburring and edge finishing of aluminum alloys: A review [электронный ресурс] // 12th International Conference on Aluminium (INALCO 2013). Montreal. URL: [https://www.researchgate.net/publication/263966600\\_Deburring\\_and\\_edge\\_finishing\\_of\\_aluminium\\_alloys\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/263966600_Deburring_and_edge_finishing_of_aluminium_alloys_A_review) (дата обращения: 12.03.2016).

321. NS. Maquinas: [электронный ресурс]. URL: <http://www.nsmaquinas.pt/> (дата обращения 20.12.2017).

322. Osborn International : каталог продукции / Osborn Pro, 2008. – 101 с.
323. Osborn: [электронный ресурс]. URL: <http://www.pferd.com/ru-ru/index.htm> (дата обращения 20.12.2017).
324. Picard: [электронный ресурс]. URL: <http://www.picard-kg.de/index.php/en/home-english> (дата обращения 20.12.2017).
325. Portlab. Производство и поставка лабораторного оборудования: [электронный ресурс]. URL: <http://www.portlab.ru/vesy/vesy-analiticheskie/20-060-117> (дата обращения 01.03.2018).
326. Pover-brush deburring for automated factories / Draney John // Tool and Prod. 1990. 55, № 12. С. 138–141.
327. Przyklenk K. Abrasive flow machining a process for surface finishing and deburring of workpiece with a complicated shape by means of an abrasive laden medium // Advances in Non-traditional Machining. 1986. PED, ASME, 22. P. 101–110.
328. Pires J. Afonso G. Force control experiments for industrial applications: a test case using an industrial deburring example // Assembly automation. 2007. Vol. 27. № 2. P. 148–156.
329. Purelogic – станки с ЧПУ и комплектующие: [электронный ресурс]. URL: <https://purelogic.ru/> (дата обращения 05.07.2018).
330. Rao R.V. Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes. London: Springer. 2011. 380 p.
331. Rao S., Shunmugam M.S. Analytical Modeling of Micro end-Milling Forces with Edge Radius and Material Strengthening Effects. // Mach. Sci. and Tech.. 2013. Vol. 16. P. 205–227.
332. Rohde, G., Einfluss von Abrichtrolle, Abrichtbedingungen und Schleifscheibe auf das Schleiergebnis. Jahrbuch Schleifen, Hohnen, Laeppen und Polieren, Vulkan Verlag, Essen. 1981. P. 299–311.
333. Sangil Han, Shreyes N. Melkote, Michael S. Haluska, Thomas R. Watkins. White layer formation due to phase transformation in orthogonal machining of AISI 1045 annealed steel // Materials Science and Engineering A 488 (2008). P. 195–204.
334. Semyonov E.N., Sidorova A.V., Pashkov A.E., Belomestnykh A.S. Accuracy assessment of Kuka KR210 R2700 Extra Industrial robot // International Journal of Engineering and Technology. 2016. Vol. 16. № 1. P. 19–25.
335. Shi Z., Srinivasaraghavan M., Attia H. Prediction of grinding force distribution in wheel and workpiece contact zone // 11 International Symposium on Advances in Abrasive Technology (Hyo-go, 30 Sept.–3 Oct., 2008) // Key Eng. Mater. 2009. № 389–390. P. 1–6.
336. Shi J., Wang J.Y., Liu C.R. Modelling White Layer Thickness Based on the Cutting Parameters of Hard Machining // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture. Vol. 220, Issue 2. 2006. P. 119–128.

337. Shmidt I.V., Dyakonov A.A. Forming Effective Cycle of Round Grinding with Radial Feed // *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 685. P. 360–364.

338. Sintrol – измерения в промышленности: [электронный ресурс]. URL: <https://www.sintrol.ru/> (дата обращения 02.04.2018).

339. Taylor Hobson: [электронный ресурс]. URL: <https://www.taylor-hobson.ru/index.html> (дата обращения 01.03.2018).

340. Tomlinson W.J., Blunt L.A., Spraggett S. The effect of workpiece speed and grinding-wheel condition on the thickness of white layers formed on EN. 24 ground surfaces // *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 25. 1991. P. 105–110.

341. Vogt C., Sinzinger S., Adelsberger H., Maurer R., Schneider F., Mandler R., Kuepper L., Rascher R., Sperber P. An Experimental Study on a Flexible Grinding Tool // *Advanced Materials Research*. Vol. 325. P. 91–96.

342. Wang G., Wang Y., Zhou H., Yan B. Experimental research of the elastic abrasive tool used for finishing mould surface // *Applied Mechanics and Materials*. Volume 101-102. 2012. P. 998–1001. International Conference on Engineering Design and Optimization, ICEDO 2011. Ningbo; China. 19–21 August 2011.

343. Weiler: [электронный ресурс]. URL: <https://www.weilercorp.com/> (дата обращения 20.12.2017).

344. Wu X., Chen Z., Zhou T., Ma C., Shu X., Dong J. Research on Processing Efficiency and Contact Characteristics of M300 Steel Surface Grinding with Elastic Abrasives // *Jixie Gongcheng Xuebao*. Journal of Mechanical Engineering. Volume 54. Issue 1. 5 January 2018. P. 171–177.

345. Wu X.-J., Zhou T.-Z., Tong Z.-X. Experimental study on surface quality in elasticity ball-end grinding of m330 steel // *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. Volume 14. Issue 11. November 2017. P. 5372–5377.

346. Wu X., Yu X., Liu R., Wu Q. Experimental study on flexible abrasive grinding of M330 steel // *Nami Jishu yu Jingmi Gongcheng*. Nanotechnology and Precision Engineering. Volume 13. Issue 3. 15 May 2015. P. 199–204.

347. Xie Y., Bhushan B. Effects of particle size, polishing pad and contact pressure in free abrasive polishing // *Wear*. Vol. 200. 1996. P. 281–295.

348. Yu A., Dong L., Wang Y. Effect of Wheel Elasticity on Grinding Stability. // *Applied Mechanics and Materials Online*: 2010-11-11. ISSN: 1662-7482, Vols. 37-38. P. 394–397.

349. Yuan J., Wu Z., Lü B., Nguyen D., Lu H., Zhao P. Review on ultra-precision polishing technology of aspheric surface // *Jixie Gongcheng Xuebao*. Journal of Mechanical Engineering. Volume 48. Issue 23. 5 December 2012. Pages 167–177.

350. Yuan J., Zhang F., Dai Y., Kang R., Yang H., Lü B. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field // *Jixie Gongcheng Xuebao*. Journal of Mechanical Engineering. Volume 46. Issue 15. 5 August 2010. P. 161–177.

351. Yu. Dimov and D. Podashev. Application of industrial robots for parts finishing // IOP: Conferences Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – vol. 463. Article number 022013. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies 2–4 October 2018, Vladivostok, Russian Federation.

352. Yuriy Dimov and Dmitriy Podashev. Robotic edge machining with abrasive brushes // MATEC: Web of Conferences. – 2018. – vol. 224. Article number 01014. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018), Sevastopol, Russia, September 10-14, 2018.

353. Zedan Y., Songmene V., Kouam J., Masou-nave J. Effects of lubrication modes on part quality during drilling 6061-T6 aluminium alloy // Int. J. Machining and Machinability of Materials. 2013. Vol. 13. № 2/3. P. 231–252.

354. Zhang L., Tam H.Y., Yuan C.-M., Chen Y.-P., Zhou Z.-D., Zheng L. On the removal of material along a polishing path by fixed abrasives // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. Volume 216. Issue 9. 2002. P. 1217–1225.

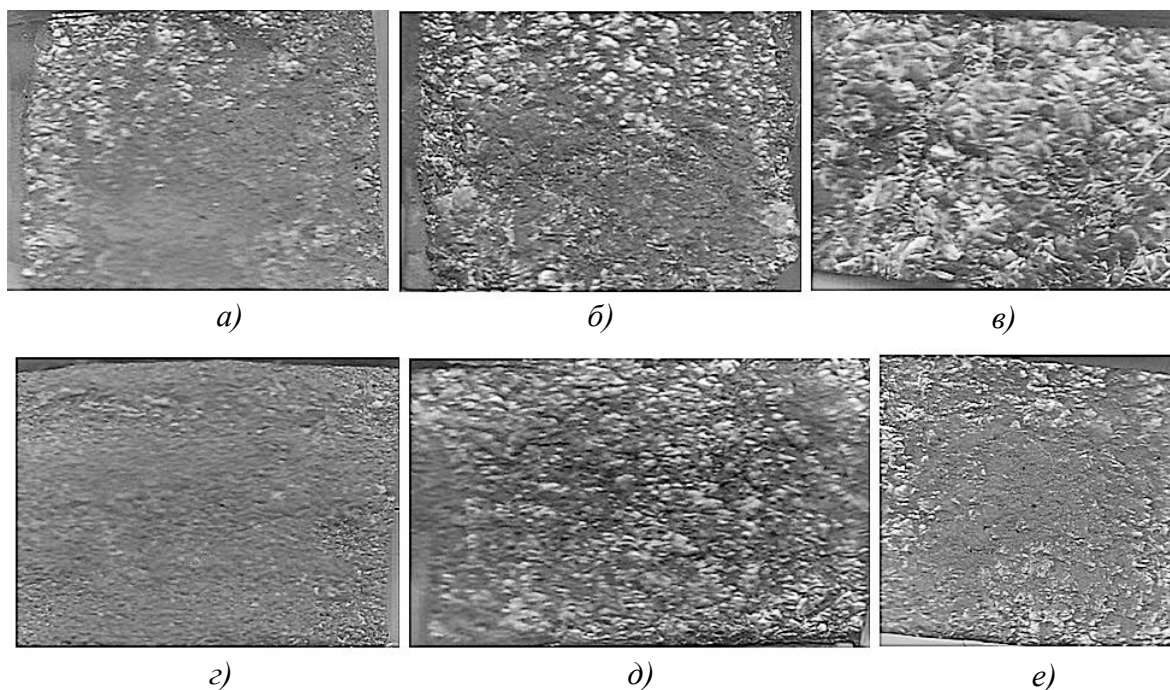
355. Zhe H., Jianyong L., Yueming L., Meng N., Wengang F. Investigating the effects of contact pressure on rail material abrasive belt grinding performance // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. October 2017. Volume 93. Issue 1–4. P. 779–786.



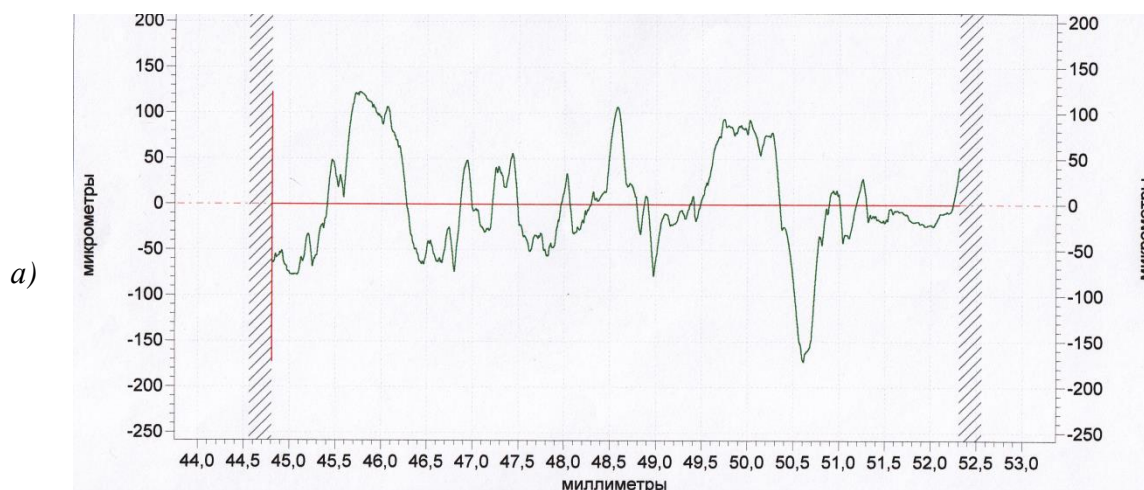
## **Приложения**

## Приложение А – Обработка поверхностей полимерно-абразивными инструментами

### А.1 Исследование режущего микрорельефа эластичных полимерно-абразивных кругов

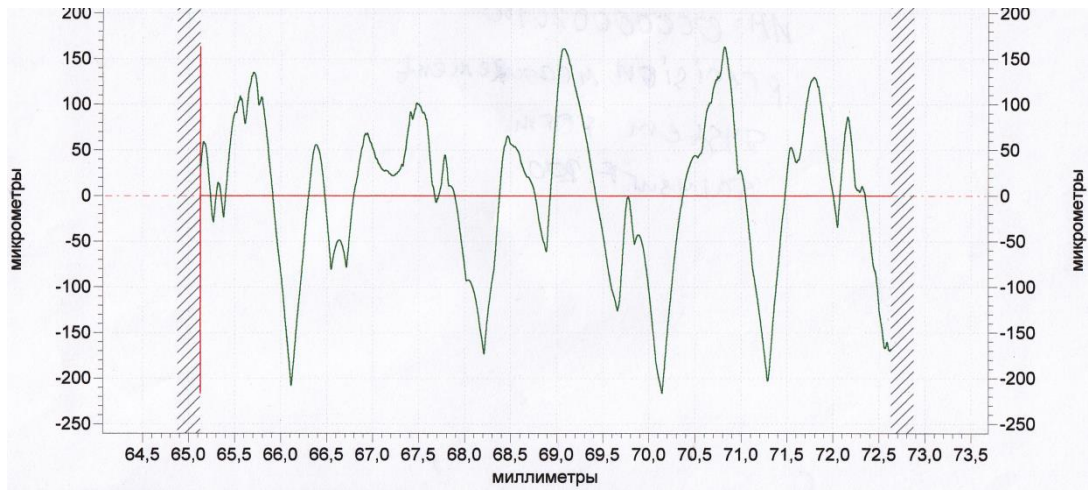


**Рисунок А.1 – Слпки, отражающие микрорельеф эластичных абразивных кругов:**  
а – круга FS-WL-8AMED; б – круга FS-WL-6SFIN; в – круга FS-WL-2SCRS;  
г – круга CF-FB-0,5AFIN; д – круга DB-WL-7SFIN; е – круга DB-WL-8SMED.

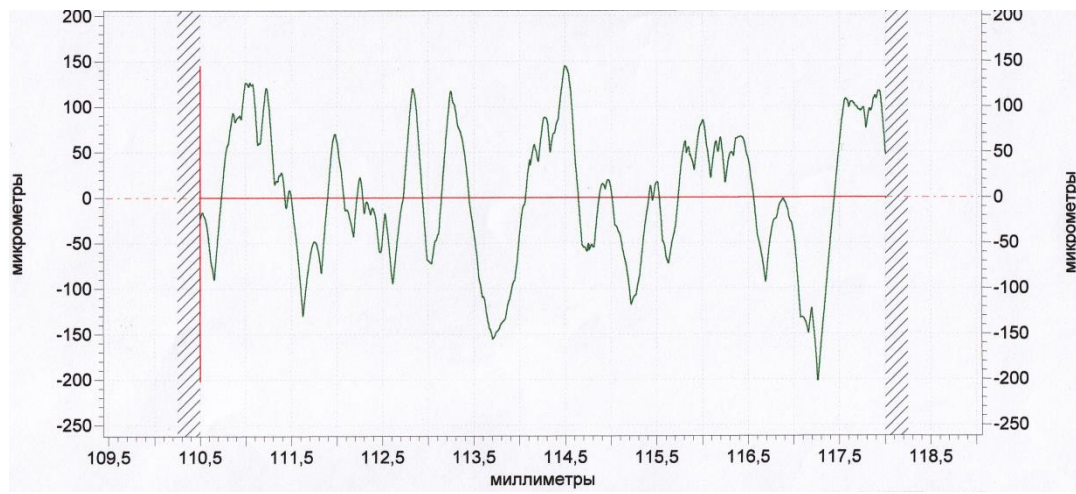


**Рисунок А.2 – Профилограммы режущей поверхности эластичных полимерно-абразивных кругов:**  
а – для круга FS-WL-6SFIN; б – для круга FS-WL-2SCRS;  
в – для круга CF-FB-0,5AFIN; г – для круга DB-WL-7SFIN; д – для круга FS-WL-8AMED

б)



в)



г)

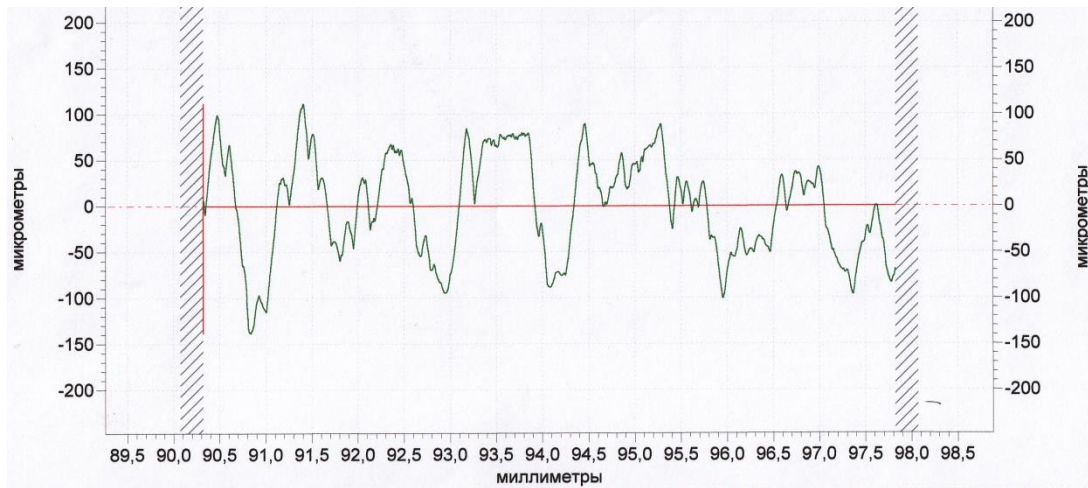


Рисунок А.2 – Продолжение

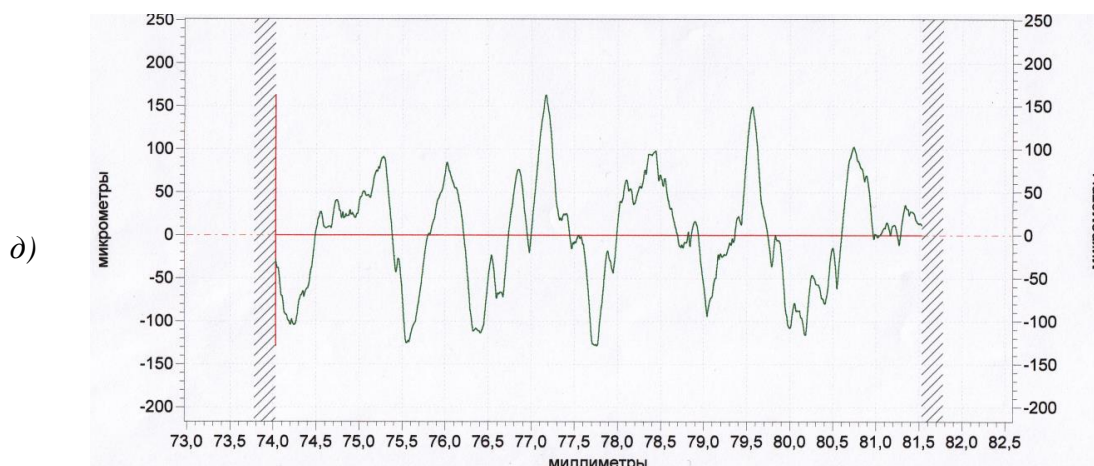


Рисунок А.2 – Окончание

## А.2 Исследование сил взаимодействия режущего микрорельефа эластичных полимерно-абразивных кругов с обрабатываемой поверхностью

*Аппроксимирующие выражения, полученные для упрощения применения разработанной теоретической математической модели силового взаимодействия в практических целях*

Данные уравнения справедливы для исследованных в настоящей работе эластичных полимерно-абразивных кругов при обработке высокопрочного алюминиевого сплава В95ПчГ2.

Уравнения получены в следующем виде:

$$P_y = a_1 \cdot \Delta Y^2 + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot S^2 + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot V + a_6 \cdot S + a_7 \cdot \Delta Y \cdot V + a_8 \cdot \Delta Y \cdot S + a_9 \cdot V \cdot S + a_{10} \cdot \Delta Y \cdot V \cdot S + a_{11}; \quad (A.1)$$

$$P_z = b_1 \cdot \Delta Y^2 + b_2 \cdot V^2 + b_3 \cdot S^2 + b_4 \cdot \Delta Y + b_5 \cdot V + b_6 \cdot S + b_7 \cdot \Delta Y \cdot V + b_8 \cdot \Delta Y \cdot S + b_9 \cdot V \cdot S + b_{10} \cdot \Delta Y \cdot V \cdot S + b_{11}. \quad (A.2)$$

Значения коэффициентов  $a_{1-10}$ ,  $b_{1-10}$  и свободных членов  $a_{11}$ ,  $b_{11}$  данных уравнений приведены в таблице А.1.

Таблица А.1 – Значения коэффициентов и свободных членов в (А.1) и (А.2)

Коэффициент	FS-WL 8A MED	FS-WL 6S FIN	FS-WL 2S CRS	DB-WL 8S MED	CF-FB 0,5A FIN
$a_1$	1,000198	1,148469	-0,295	1,111331	0,05
$a_2$	$-1,169 \cdot 10^{-7}$	$-5,43 \cdot 10^{-8}$	$-1,607 \cdot 10^{-6}$	$-7,7919 \cdot 10^{-8}$	$3,041 \cdot 10^{-7}$
$a_3$	$7,468 \cdot 10^{-8}$	$-6,845 \cdot 10^{-7}$	$-3,583 \cdot 10^{-6}$	$4,9786 \cdot 10^{-8}$	$-5,113 \cdot 10^{-7}$
$a_4$	$5,066 \cdot 10^{-4}$	0,095697	1,685	$3,3773 \cdot 10^{-4}$	0,15
$a_5$	$-4,6429 \cdot 10^{-5}$	$-4,8886 \cdot 10^{-5}$	$-2,7 \cdot 10^{-3}$	$-5,2 \cdot 10^{-4}$	$-5,4963 \cdot 10^{-5}$
$a_6$	$-3,5357 \cdot 10^{-4}$	$1,65714 \cdot 10^{-5}$	$-5,5 \cdot 10^{-3}$	$-3,5357 \cdot 10^{-4}$	$-9,4382 \cdot 10^{-4}$
$a_7$	$6,071 \cdot 10^{-9}$	$-8,857 \cdot 10^{-7}$	$1,3395 \cdot 10^{-3}$	$4,0476 \cdot 10^{-9}$	$4,80222 \cdot 10^{-5}$



Продолжение таблицы А.1

$a_8$	$1,6786 \cdot 10^{-8}$	$5,1143 \cdot 10^{-5}$	$3,613 \cdot 10^{-3}$	$1,1191 \cdot 10^{-8}$	$1,39778 \cdot 10^{-4}$
$a_9$	$4,05 \cdot 10^{-11}$	$6,25 \cdot 10^{-8}$	$1,7415 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-11}$	$8,178 \cdot 10^{-7}$
$a_{10}$	$-3,39 \cdot 10^{-11}$	$-3,39 \cdot 10^{-8}$	$-6,455 \cdot 10^{-6}$	$-2,26 \cdot 10^{-11}$	$-4,154 \cdot 10^{-7}$
$a_{11}$	0,0625	0,385	-0,65	0,291	-0,2
$b_1$	0,4000792	0,5742343	-0,1475	0,4630546	0,025
$b_2$	$-2,3376 \cdot 10^{-7}$	$-2,143 \cdot 10^{-7}$	$-8,035 \cdot 10^{-7}$	$-3,896 \cdot 10^{-8}$	$7,342 \cdot 10^{-7}$
$b_3$	$1,4936 \cdot 10^{-9}$	$-3,423 \cdot 10^{-7}$	$-1,7915 \cdot 10^{-6}$	$2,4893 \cdot 10^{-8}$	$-8,334 \cdot 10^{-7}$
$b_4$	$2,0264 \cdot 10^{-4}$	0,04784857	0,9	$8,4433 \cdot 10^{-6}$	0,03
$b_5$	$-9,2857 \cdot 10^{-7}$	$-2,73 \cdot 10^{-4}$	$-1,35 \cdot 10^{-3}$	$-2,6 \cdot 10^{-4}$	$-8,2444 \cdot 10^{-6}$
$b_6$	$-7,0714 \cdot 10^{-5}$	$5,4286 \cdot 10^{-6}$	$-2,75 \cdot 10^{-3}$	$-1,7679 \cdot 10^{-4}$	$-8,587 \cdot 10^{-5}$
$b_7$	$1,2143 \cdot 10^{-10}$	$-4,429 \cdot 10^{-7}$	$6,6975 \cdot 10^{-4}$	$2,0238 \cdot 10^{-9}$	$1,20056 \cdot 10^{-5}$
$b_8$	$3,3571 \cdot 10^{-10}$	$2,55714 \cdot 10^{-5}$	$1,8065 \cdot 10^{-3}$	$5,5952 \cdot 10^{-9}$	$3,49444 \cdot 10^{-5}$
$b_9$	$8,09 \cdot 10^{-13}$	$3,13 \cdot 10^{-8}$	$8,7075 \cdot 10^{-6}$	$1,35 \cdot 10^{-11}$	$2,044 \cdot 10^{-7}$
$b_{10}$	$-6,78 \cdot 10^{-13}$	$-1,7 \cdot 10^{-8}$	$-3,2275 \cdot 10^{-6}$	$-1,13 \cdot 10^{-11}$	$-1,038 \cdot 10^{-7}$
$b_{11}$	0,05125	0,1525	-0,28	0,291	-0,05

Результаты расчета упругой ( $P_{yn}$ ) и центробежной составляющей силы ( $P_{ц}$ ), а также нормальной составляющей силы резания ( $P_{y теор}$ ) по разработанной теоретической математической модели, а также экспериментальные данные ( $P_{y эксп}$ ) приведены в таблицах А.2 – А.6.

Таблица А.2 – Результаты расчета сил для круга FS-WL 8A MED

$V$ , м/с	$S$ , мм/мин	$\Delta Y$ , мм	$P_{y эксп}$ , Н	$P_{yn}$ , Н	$P_{ц}$ , Н	$P_{y теор}$ , Н
3,68	130	1,5	2,252	2,052	0,071	2,123
7,36			2,221	2,117	0,180	2,297
11,77			2,178	1,872	0,302	2,174
14,71			2,121	1,706	0,354	2,059
11,77	130	1,0	0,927	0,934	0,205	1,139
		1,5	2,178	1,872	0,302	2,174
		2,0	3,928	2,605	0,180	2,786
11,77	42	1,5	2,208	1,907	0,302	2,209
	130		2,178	1,872	0,302	2,174
	255		2,137	1,829	0,302	2,131
	395		2,094	1,794	0,302	2,096

Таблица А.3 – Результаты расчета сил для круга FS-WL 6S FIN

$V$ , м/с	$S$ , мм/мин	$\Delta Y$ , мм	$P_{y эксп}$ , Н	$P_{yn}$ , Н	$P_{ц}$ , Н	$P_{y теор}$ , Н
6,78	130	1,5	3,078	2,935	0,144	3,079
10,85			3,052	2,820	0,234	3,054
13,56			3,019	2,756	0,261	3,017
10,85	130	1,0	1,567	1,460	0,107	1,567
		1,5	3,052	2,82	0,234	3,054
		2,0	5,111	4,917	0,194	5,111
10,85	42	1,5	3,053	2,820	0,234	3,054
	130		3,052	2,82	0,234	3,054
	255		3,031	2,802	0,234	3,037
	395		2,983	2,751	0,234	2,985

**Таблица А.4 – Результаты расчета сил для круга FS-WL 2S CRS**

$V$ , м/с	$S$ , мм/мин	$\Delta Y$ , мм	$P_{у эксп}$ , Н	$P_{ун}$ , Н	$P_{ц}$ , Н	$P_{у теор}$ , Н
3,85	130	2,5	2,220	2,167	0,056	2,222
7,71			2,145	2,016	0,126	2,142
12,33			1,891	1,745	0,146	1,891
12,33	130	2,0	1,300	1,117	0,182	1,299
		2,5	1,891	1,745	0,146	1,891
		3,0	2,333	2,208	0,125	2,333
12,33	42	2,5	1,554	1,408	0,146	1,554
	130		1,891	1,745	0,146	1,891
	255		2,273	2,128	0,146	2,274
	395		2,567	2,422	0,146	2,568

**Таблица А.5 – Результаты расчета сил для круга DB-WL 8S MED**

$V$ , м/с	$S$ , мм/мин	$\Delta Y$ , мм	$P_{у эксп}$ , Н	$P_{ун}$ , Н	$P_{ц}$ , Н	$P_{у теор}$ , Н
7,74	130	1,5	2,485	2,315	0,170	2,485
12,38			2,340	2,100	0,240	2,340
15,48			2,188	2,002	0,184	2,186
12,38	130	1,0	0,951	0,800	0,151	0,951
		1,5	2,340	2,100	0,240	2,340
		2,0	4,285	4,043	0,240	4,283
12,38	42	1,5	2,371	2,131	0,240	2,371
	130		2,340	2,100	0,240	2,340
	255		2,299	2,058	0,240	2,298
	395		2,254	2,013	0,240	2,253

**Таблица А.6 – Результаты расчета для круга CF-FB 0,5A FIN**

$V$ , м/с	$S$ , мм/мин	$\Delta Y$ , мм	$P_{у эксп}$ , Н	$P_{ун}$ , Н	$P_{ц}$ , Н	$P_{у теор}$ , Н
10,472	130	4	1,280	1,027	0,254	1,281
16,755			1,476	1,052	0,423	1,475
20,944			1,656	1,167	0,489	1,656
16,755	130	3	0,964	0,543	0,420	0,963
		3,5	1,208	0,786	0,423	1,209
		4,0	1,476	1,052	0,423	1,475
		4,5	1,770	1,346	0,423	1,769
16,755	42	4	1,5925	1,170	0,423	1,593
	130		1,476	1,052	0,423	1,475
	255		1,298	0,872	0,423	1,296
	395		1,078	0,654	0,423	1,078

### А.3 Производительность процесса обработки и шероховатость обработанной поверхности при зачистке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами

**А.3.1 Результаты расчета съема материала по разработанной теоретической математической модели (относительный съем  $Q_T$  и удельный съем  $q_T$ ), а также экспериментальные данные ( $q_s$ ) при обработке плоскостей эластичными полимерно-абразивными кругами**

Приведены в таблицах А.7–А.11.

**Таблица А.7 – Результаты расчета съема материала для круга FS-WL 8A MED**

$V$ , м/мин	$S$ , мм/мин	$\Delta Y$ , мм	$P_y$ , Н	$q_s$ , мкм/(м·мин)	$q_T$ , мкм/(м·мин)	$Q_T$ , мкм/мин
220,7	130	1,5	2,253	0,240	0,240	52,936
441,4			2,226	0,197	0,198	87,346
551,7			2,208	0,174	0,183	101,108
706,2			2,178	0,141	0,144	101,435
441,4	130	0,5	0,225	0,058	0,059	25,894
		1,0	0,975	0,126	0,132	58,138
		1,5	2,226	0,197	0,198	87,346
		2,0	3,976	0,270	0,272	120,103
441,4	42	1,5	2,256	0,062	0,062	27,387
	130		2,226	0,197	0,198	87,346
	255		2,185	0,466	0,471	207,816
	395		2,142	0,626	0,631	278,172

**Таблица А.8 – Результаты расчета съема материала для круга FS-WL 6S FIN**

$V$ , м/мин	$S$ , мм/мин	$\Delta Y$ , мм	$P_y$ , Н	$q_s$ , мкм/(м·мин)	$q_T$ , мкм/(м·мин)	$Q_T$ , мкм/мин
203,4	130	1,5	3,101	0,027	0,025	5,075
406,8			3,084	0,020	0,018	7,446
508,5			3,074	0,016	0,017	8,45
650,9			3,058	0,011	0,013	8,665
406,8	130	0,5	0,686	0,004	0,0036	1,456
		1,0	1,599	0,012	0,0089	3,62
		1,5	3,084	0,020	0,018	7,446
		2,0	5,144	0,028	0,026	10,443
406,8	42	1,5	3,086	0,011	0,0097	3,937
	130		3,084	0,020	0,018	7,446
	255		3,064	0,032	0,029	11,889
	395		3,015	0,044	0,040	16,105

Таблица А.9 – Результаты расчета съема материала для круга FS-WL 2S CRS

$v$ , М/МИН	$S$ , ММ/ МИН	$\Delta Y$ , ММ	$P_y$ , Н	$q_{\Delta}$ , МКМ/ М·МИН	$q_T$ , МКМ/ М·МИН	$Q_T$ , МКМ/МИН
231,2	130	2,5	2,220	0,112	0,112	25,856
464,4			2,151	0,099	0,097	44,962
578,1			2,051	0,094	0,096	55,569
739,9			1,841	0,088	0,083	61,475
464,4	130	1,5	0,944	0,02	0,019	8,980
		2,0	1,621	0,049	0,047	21,746
		2,5	2,151	0,099	0,097	44,962
		3,0	2,532	0,170	0,168	77,591
464,4	42	2,5	1,842	0,087	0,084	39,006
	130		2,151	0,099	0,097	44,962
	255		2,494	0,117	0,118	54,522
	395		2,745	0,136	0,144	66,749

Таблица А.10 – Результаты расчета съема материала для круга DB-WL 8S MED

$V$ , М/МИН	$S$ , ММ/ МИН	$\Delta Y$ , ММ	$P_y$ , Н	$q_{\Delta}$ , МКМ/ М·МИН	$q_T$ , МКМ/ М·МИН	$Q_T$ , МКМ/МИН
232,2	130	1,5	2,620	0,263	0,263	61,010
464,3			2,489	0,222	0,222	103,105
580,4			2,419	0,200	0,214	123,984
742,9			2,318	0,171	0,171	126,970
464,4	130	0,5	0,266	0,082	0,082	38,225
		1,0	0,990	0,150	0,096	44,623
		1,5	2,489	0,222	0,222	103,105
		2,0	4,434	0,294	0,294	136,403
464,4	42	1,5	2,519	0,068	0,068	31,500
	130		2,489	0,222	0,222	103,105
	255		2,447	0,429	0,429	199,030
	395		2,402	0,647	0,647	299,934

Таблица А.11 – Результаты расчета съема материала для круга CF-FB-0,5AFIN

$V$ , М/МИН	$S$ , ММ/ МИН	$\Delta Y$ , ММ	$P_y$ , Н	$q_{\Delta}$ , МКМ/ М·МИН	$q_T$ , МКМ/ М·МИН	$Q_T$ , МКМ/МИН
303,2	130	4	1,178	0,087	0,085	25,858
606,3			1,270	0,068	0,066	40,183
757,9			1,337	0,059	0,060	45,221
970,1			1,454	0,046	0,047	45,906
606,3	130	3	0,755	0,055	0,054	32,534
		3,5	1,000	0,062	0,060	36,317
		4,0	1,270	0,068	0,066	40,183
		4,5	1,565	0,075	0,073	44,294
606,3	42	4	1,356	0,011	0,010	6,131
	130		1,270	0,068	0,066	40,183
	255		1,133	0,142	0,145	87,601
	395		0,961	0,214	0,221	134,167



### А.3.2 Аппроксимирующие выражения, полученные для упрощения применения полученной теоретической математической модели съема материала в практических целях

Следует отметить, что данные уравнения справедливы только для исследованных в настоящей работе эластичных полимерно-абразивных кругов при обработке высокопрочного алюминиевого сплава В95ПчТ2.

Для относительного съема  $Q$  (мкм/мин) зависимости имеют вид:

$$Q = a_1 \cdot \Delta Y^2 + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot S^2 + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot V + a_6 \cdot S + a_7 \cdot \Delta Y \cdot V + a_8 \cdot \Delta Y \cdot S + a_9 \cdot V \cdot S + a_{10} \cdot \Delta Y \cdot V \cdot S + a_{11}, \quad (\text{A.3})$$

где  $V$  – скорость резания, м/мин;  $\Delta Y$  – деформация круга, мм;  $S$  – продольная подача, мм/мин.

Значения коэффициентов  $a_1$ – $a_{10}$  и свободного члена  $a_{11}$  уравнения (А.3) приведены в таблице А.12.

**Таблица А.12 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (А.3)**

Коэффициент	FS-WL 8A MED	FS-WL 6S FIN	FS-WL 2S CRS	CF-FB 0,5A FIN	DB-WL 8S MED
$a_1$	5	2,5	24	$1 \cdot 10^{-13}$	10
$a_2$	$-1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-5}$	$-8 \cdot 10^{-5}$	$-1,4 \cdot 10^{-4}$
$a_3$	$3 \cdot 10^{-4}$	$-4,5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$-8 \cdot 10^{-5}$	$-4 \cdot 10^{-4}$
$a_4$	52,5	0,45	-63,2	10,4	41,8
$a_5$	0,1531	0,0184	0,0999	0,1489	0,279
$a_6$	0,5795	0,0333	0,0415	0,3826	0,9631
$a_7$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
$a_8$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
$a_9$	$3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$
$a_{10}$	$-1 \cdot 10^{-7}$	$-1 \cdot 10^{-7}$	$-1 \cdot 10^{-7}$	$-1 \cdot 10^{-7}$	$-1 \cdot 10^{-7}$
$a_{11}$	-156	-11,75	2	-108	-203

Для удельного съема  $q$  (мкм/м·мин) зависимости представлены в виде:

$$q = a_1 \cdot \Delta Y^2 + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot S^2 + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot V + a_6 \cdot S + a_7 \cdot \Delta Y \cdot V + a_8 \cdot \Delta Y \cdot S + a_9 \cdot V \cdot S + a_{10} \cdot \Delta Y \cdot V \cdot S + a_{11}, \quad (\text{A.4})$$

где  $V$  – скорость резания, м/мин;  $\Delta Y$  – деформация круга, мм;  $S$  – продольная подача, мм/мин.

Значения коэффициентов  $a_1$ – $a_{10}$  и свободного члена  $a_{11}$  уравнения (А.4) приведены в таблице А.13.

**Таблица А.13 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (А.4)**

Коэффициент	FS-WL 8A MED	FS-WL 6S FIN	FS-WL 2S CRS	CF-FB 0,5A FIN	DB-WL 8S MED
$a_1$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	0,042	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$
$a_2$	$-1 \cdot 10^{-8}$	$-1 \cdot 10^{-9}$	$3,2 \cdot 10^{-8}$	$-2 \cdot 10^{-9}$	$-1 \cdot 10^{-8}$

$a_3$	$-1 \cdot 10^{-8}$	$-3,5 \cdot 10^{-8}$	$-1 \cdot 10^{-8}$	$-3 \cdot 10^{-7}$	$-4 \cdot 10^{-7}$
$a_4$	0,13	0,015	-0,089	0,014	0,13
$a_5$	$-2,3 \cdot 10^{-4}$	$-4 \cdot 10^{-5}$	$-8 \cdot 10^{-5}$	$-6 \cdot 10^{-5}$	$-2 \cdot 10^{-4}$
$a_6$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
$a_7$	$5,6693 \cdot 10^{-6}$	$5,6693 \cdot 10^{-7}$	$5,6693 \cdot 10^{-7}$	$1,13386 \cdot 10^{-6}$	$5,6693 \cdot 10^{-6}$
$a_8$	$2,5771 \cdot 10^{-5}$	$2,5771 \cdot 10^{-6}$	$2,5771 \cdot 10^{-6}$	$5,1542 \cdot 10^{-6}$	$2,5771 \cdot 10^{-5}$
$a_9$	$3,4487 \cdot 10^{-7}$	$3,4487 \cdot 10^{-8}$	$3,4487 \cdot 10^{-8}$	$6,8974 \cdot 10^{-8}$	$3,4487 \cdot 10^{-7}$
$a_{10}$	$-1,1774 \cdot 10^{-7}$	$-1,1774 \cdot 10^{-8}$	$-1,1774 \cdot 10^{-8}$	$-2,3548 \cdot 10^{-8}$	$-1,1774 \cdot 10^{-7}$
$a_{11}$	-0,119	$-1,5 \cdot 10^{-3}$	0,07	-0,04	-0,123

### А.3.3 Программное обеспечение для расчета съема материала при обработке плоскостей эластичными полимерно-абразивными кругами

Для реализации математической модели расчета съема разработана программа с использованием приложения Borland C++ Builder 6.0, блок-схема которой представлена на рисунке 3.20.

*Листинг программы, предназначенной для реализации  
математической модели расчета съема материала при обработке плоскостей  
эластичными полимерно-абразивными кругами*

```

void __fastcall
TForm2::Button1Click(TObject *Sender)
{
//Объявление переменных
float n1, n2, m1, m2, sigma1, sigma2, k, Rk,
Cr, deltay, mut, ro;
float Pk, Py, lambda, fi, L, sigmae, r1, r2,
re, gamma, gamm1, resgamma, result;
float nk, S, m, d, A, B, Rcentr, Pcentr, r,
Vc, Sp, fp;
float eye, fie, fi0, A0, Ae, ksi0, Sc, st, Enc,
Qc, q, l;
float massa, objemkruga, Pdin, shirina,
Vkruga;
//Прием исходных данных с формы
nk=StrToFloat(Edit14->Text);
k=StrToFloat(Edit1->Text);
Cr=StrToFloat(Edit6->Text);
deltay=StrToFloat(Edit7->Text);
n1=StrToFloat(Edit3->Text);
m1=StrToFloat(Edit4->Text);
sigma1=StrToFloat(Edit5->Text);
n2=StrToFloat(Edit12->Text);
m2=StrToFloat(Edit11->Text);
sigma2=StrToFloat(Edit10->Text);
Rk=StrToFloat(Edit8->Text);
mut=StrToFloat(Edit2->Text);
ro=StrToFloat(Edit15->Text);
r=StrToFloat(Edit16->Text);
Rcentr=StrToFloat(Edit17->Text);
fi=acos(1-(deltay/Rk));
lambda=n1/m1;
Sp=StrToFloat(Edit9->Text);
shirina=StrToFloat(Edit20->Text);
l=StrToFloat(Edit21->Text);
L=2*sqrt(2*deltay*Rk-deltay*deltay);

```

```

r1=(3*sqrt(3.14159265359))/(16*3.1415926
5359*3.14159265359*m1*n1*sigma1);
if (m2==0||n2==0||sigma2==0)
{ re=r1;
sigmae=sigma1;
}
else
{
r2=(3*sqrt(3.14159265359))/(16*3.1415926
5359*3.14159265359*m2*n2*sigma2);
re=(r1*r2)/(r1+r2);
sig-
mae=sqrt(sigma1*sigma1+sigma2*sigma2);
}
Pk=0.5*Cr*Rk*Rk*(2*fi-sin(2*fi));
//Расчет центробежной составляющей
силы
d=Rk-r-deltay;
A=(d+deltay)*(1-Rk/(deltay));
B=Rk*(1+(d/deltay));
S=(2*Rk*(A*fi+B*sin(fi)));
Vc=(3.14159265359*nk*Rcentr)/30;
m=(ro*S)/1000000000;
Pcentr=m*Vc*Vc/Rcentr;
//Расчет динамической составляющей си-
лы
objemkruga((((3.1415926535*Rk*Rk)/100
0000)-
((3.1415926535*r*r)/1000000))*(shirina/10
00);
massa=ro*objemkruga;
Vkruga=(3.1415926535*2*Rk*nk)/60000;
Pdin=(massa*Vkruga*Vkruga*(sin(fi))*sqrt

```

```

((0.5*(0.000001*Rk*Rk+0.000001*r*r)))/
0.000001*I*Rk*shirina);
//Подбор искомого значения γ
float i;
gamm1=0;
i=0;
resgamma=0;
for(gamma=1;gamma<=3.99; gam-
ma=gamma+0.00001)
{
fp=(sigmae/re)*(pow(gamma,0.802)+0.97-
gamma);
Py=k*re*re*L*(0.6266*n1*n1*gamma*
*exp(-
gamma*gamma/2))*14.387*pow(fp,0.895);
result=Py/(Pk+Pcentr+Pdin);
if (result>=0.95 && result<=1.05)
{
gamm1=gamm1+gamma;
i=i+1;
}
}
if (i==0)
{
ShowMessage("Нет таких gamma") ;
}
else {
resgamma=gamm1/i;
st=(resgamma*resgamma/(-2));
Enc=0.6266*n1*n1*resgamma*exp(st);
eye
=sigmae*((pow(resgamma,0.802)+0.97)-
resgamma);
fie=acos(1-(eye/re));
fi0=0.5*acos(2*mut);

```

```

A0=0.5*fi0-0.25*sin(2*fi0);
Ae=0.5*fie-0.25*sin(2*fie);
ksi0=(0.25*3.14159265359)-
0.5*acos(2*mut);
Sc=2*re*re*sin(ksi0)*(Ae-A0);
Qc=Sc*Enc*L;
q=(Qc*Sp*1000000)/(3.14159265359*2*Rk
*nk-Sp);
ShowMessage(q);
}
}

```

#### **А.3.4 Программное обеспечение для расчета шероховатости обработанной поверхности по параметру $Ra$ при обработке плоскостей эластичными полимерно-абразивными кругами**

Разработанные теоретические математические модели, предназначенные для расчета достижимой шероховатости обработанной поверхности по параметру  $Ra$ , реализованы в виде программного обеспечения с использованием приложения Borland C++ Builder 6.0.

*Листинг программы, предназначенной для реализации  
математической модели расчета шероховатости обработанной  
поверхности по параметру  $Ra$  при обработке  
эластичными полимерно-абразивными кругами*

```

void __fastcall
TForm2::Button1Click(TObject *Sender)
{
//Объявление переменных
float n1, n2, m1, m2, sigma1, sigma2, k,
Rk, Cr, deltay, mut, ro;
float Pk, Py, lambda, fi, L, sigmae, r1, r2,
re, gamma, gamm1, resgamma, result;
float nk, S, m, d, A, B, Rcentr, Pcentr, r,
Vc, tgamma, Sp, fp;
float eye, Ra, l, st, Enc;
float massa, objemkruga, Pdin, shirina,
Vkruga;
//Прием исходных данных с формы
nk=StrToFloat(Edit14->Text);
k=StrToFloat(Edit1->Text);
Cr=StrToFloat(Edit6->Text);
deltay=StrToFloat(Edit7->Text);
n1=StrToFloat(Edit3->Text);
m1=StrToFloat(Edit4->Text);
sigma1=StrToFloat(Edit5->Text);
n2=StrToFloat(Edit12->Text);
m2=StrToFloat(Edit11->Text);
sigma2=StrToFloat(Edit10->Text);
Rk=StrToFloat(Edit8->Text);
mut=StrToFloat(Edit2->Text);
ro=StrToFloat(Edit15->Text);
r=StrToFloat(Edit16->Text);
Rcentr=StrToFloat(Edit17->Text);
fi=acos(1-(deltay/Rk));
lambda=n1/m1;
Sp=StrToFloat(Edit9->Text);
shirina=StrToFloat(Edit20->Text);
l=StrToFloat(Edit21->Text);
L=2*sqrt(2*deltay*Rk-deltay*deltay);
}

```

```

r1=(3*sqrt(3.14159265359))/(16*3.1415926
5359*3.14159265359*m1*n1*sigma1);
if (m2==0||n2==0||sigma2==0)
{ re=r1;
sigmae=sigma1;
}
else
{
r2=(3*sqrt(3.14159265359))/(16*3.1415926
5359*3.14159265359*m2*n2*sigma2);
re=(r1*r2)/(r1+r2);
sig-
mae=sqrt(sigma1*sigma1+sigma2*sigma2);
}
Pk=0.5*Cr*Rk*Rk*(2*fi-sin(2*fi));
//Расчет центробежной составляющей
силы
d=Rk-r-deltay;
A=(d+deltay)*(1-Rk/(deltay));
B=Rk*(1+(d/deltay));
S=(2*Rk*(A*fi+B*sin(fi)));
}
}
if (i==0)
{
ShowMessage("Нет таких gamma");
}
else {
resgamma=gamm1/i;
st=(resgamma*resgamma/(-2));
Enc=0.6266*n1*n1*resgamma*exp(st);
eye
=sigmae*((pow(resgamma,0.802)+0.97)-
resgamma);
Ra=0.2*eye*1000;

```

```

Vc=(3.14159265359*nk*Rcentr)/30;
m=(ro*S)/1000000000;
Pcentr=m*Vc*Vc/Rcentr;
//Подбор искомого значения γ
float i;
gamm1=0;
i=0;
resgamma=0;
for(gamma=1;gamma<=3.99; gam-
ma=gamma+0.00001)
{
fp=(sigmae/re)*(pow(gamma,0.802)+0.97-
gamma);
Py=k*re*re*L*(0.6266*n1*n1*gamma*
*exp(-
gamma*gamma/2))*14.387*pow(fp,0.895);
result=Py/(Pk+Pcentr);
if (result>=0.95 && result<=1.05)
{
gamm1=gamm1+gamma;
i=i+1;
ShowMessage(Ra) ;
}
}
}

```

### А.3.5 Параметры и их идентификаторы в программах расчета съема материала и достижимой шероховатости обработанной поверхности при обработке плоскостей эластичными полимерно-абразивными кругами

В вышеприведенных программах расчета съема материала и достижимой шероховатости обработанной поверхности при обработке плоскостей эластичными полимерно-абразивными кругами использованы следующие параметры и их идентификаторы (таблица А.14):

Таблица А.14 – Параметры и их идентификаторы в программах п. А.3.3 и п. А.3.4

Наименование параметров	Обозначение в теории	Идентификатор в программе	Тип данных	Единицы измерения	Примечания
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Предел прочности на сдвиг	$K$	K	Вещ.	МПа	Входной параметр
Жесткость эластичного абразивного круга	$C_r$	Cr	Вещ.	Н/(мм <sup>2</sup> ·м) м)	Входной параметр
Деформация круга	$\Delta Y$	deltay	Вещ.	мм	Входной параметр
Среднее квадратическое отклонение (параметр микрорельефа круга)	$\sigma_1$	sigma1	Вещ.	мкм	Входной параметр
Среднее число нулей (параметр микрорельефа круга)	$n_1(0)$	n1	Вещ.	мкм <sup>-1</sup>	Входной параметр
Среднее число максимумов (параметр микрорельефа круга)	$m_1$	m1	Вещ.	мкм <sup>-1</sup>	Входной параметр
Среднее квадратическое отклонение (параметр микрорельефа обрабатываемой поверхности)	$\sigma_2$	sigma2	Вещ.	мкм	Входной параметр
Среднее число нулей (параметр микрорельефа обрабатываемой поверхности)	$n_2(0)$	n2	Вещ.	мкм <sup>-1</sup>	Входной параметр
Среднее число максимумов (параметр микрорельефа обрабатываемой поверхности)	$m_2$	m2	Вещ.	мкм <sup>-1</sup>	Входной параметр
Радиус круга	$R_k$	Rk	Вещ.	мм	Входной параметр
Ширина круга	$B_k$	shirina	Вещ.	мм	Входной параметр
Плотность связки круга	$\gamma_k$	ro	Вещ.	кг/м <sup>3</sup>	Входной параметр
Коэффициент трения при пластическом контакте	$\mu_t$	mut	Вещ.	Безразмерный коэффициент	Входной параметр
Радиус отверстия круга	$r_k$	r <sub>k</sub>	Вещ.	мм	Входной параметр

Продолжение таблицы А.14

1	2	3	4	5	6
Расстояние от центра круга до центра тяжести	$R_{ц}$	Rcentr	Вещ.	м	Входной параметр
Продольная подача	$S$	Sp	Вещ.	мм/мин	Входной параметр
Длина участка, на котором длится ударный процесс	$l_{уд}$	l	Вещ.	мм	Входной параметр
Параметр микрорельефа круга	$\lambda$	lambda	Вещ.	Безразмерная величина	
Угол $\varphi$	$\varphi$	fi	Вещ.	рад.	
Длина участка контакта при заданной деформации круга $\Delta u$	$L_k$	L	Вещ.	мм	
Радиус кривизны вершин выступов микрорельефа круга	$r_I$	r1	Вещ.	мкм	
Радиус кривизны вершин выступов микрорельефа обрабатываемой поверхности	$r_{II}$	r2	Вещ.	мкм	
Эквивалентный радиус микронеровностей режущей поверхности и шероховатости обрабатываемой поверхности	$r_{э}$	re	Вещ.	мкм	
Среднее квадратическое отклонение эквивалентной поверхности	$\sigma_{э}$	sigmae	Вещ.	мкм	
Вспомогательный параметр	$d$	d	Вещ.	мм	
Вспомогательный параметр	$A$	A	Вещ.	мм	
Вспомогательный параметр	$B$	B	Вещ.	мм	
Скорость вращения центра тяжести деформированного материала круга	$V_{ц}$	Vc	Вещ.	м/с	
Масса деформированного материала круга	$m$	m	Вещ.	кг	
Центробежная составляющая силы	$P_{ц}$	Pcentr	Вещ.	Н	
Масса круга	$m_k$	massa	Вещ.	кг	
Скорость вращения круга	$V$	Vkruga	Вещ.	м/с	
Объем круга	-	objemkruga	Вещ.	мм <sup>3</sup>	
Динамическая составляющая силы	$P_{дин}$	Pdin	Вещ.	Н	
Вспомогательный параметр для расчета искомого значения $\gamma$	-	i	Цел.	-	
Вспомогательный параметр для расчета искомого значения $\gamma$	-	gamm1	Вещ.	-	
Возможные значения параметра $\gamma$	-	gamma	Вещ.	мкм	Используется в цикле

Окончание таблицы А.14

1	2	3	4	5	6
Вспомогательный параметр для расчета значения $P_y$	-	fp	Вещ.	-	
Нормальная составляющая силы резания на единичном зерне	$P_y$	$P_y$	Вещ.	Н	
Вспомогательный параметр для расчета искомого значения $\gamma$	-	result	Вещ.	-	
Искомое значение $\gamma$	$\gamma$	resgamma	Вещ.	мкм	
Вспомогательный параметр для расчета количества зёрен эластичного круга, находящихся в контакте	-	st	Вещ.	-	
Количество зёрен эластичного круга, находящихся в контакте	$E(N)$	Enc	Вещ.	шт.	
Математическое ожидание глубины внедрения выступов, пластически деформирующих материал	$E(yE)$	eye	Вещ.	мм	
Вспомогательный параметр для расчета площади поперечного сечения стружки на единичном зерне	$\varphi_E$	fie	Вещ.	рад.	
Вспомогательный параметр для расчета площади поперечного сечения стружки на единичном зерне	$\varphi_0$	fi0	Вещ.	рад.	
Вспомогательный параметр для расчета площади поперечного сечения стружки на единичном зерне	$A_E$	Ae	Вещ.	рад.	
Вспомогательный параметр для расчета площади поперечного сечения стружки на единичном зерне	$A_0$	A0	Вещ.	рад.	
Вспомогательный параметр для расчета площади поперечного сечения стружки на единичном зерне	$\psi_0$	ksi0	Вещ.	рад.	
Площадь поперечного сечения стружки на единичном зерне	$S_c$	Sc	Вещ.	мм <sup>2</sup>	
Объем материала срезанного эластичным кругом на 1 мм <sup>2</sup> поверхности	$Q_{cl}$	Qc	Вещ.	мм <sup>3</sup>	
Удельный съём с площади а 1 мм <sup>2</sup>	$q$	q	Вещ.	мкм/м·мин	Выходной параметр
Достижимая шероховатость по параметру Ra	$Ra$	Ra	Вещ.	мкм	Выходной параметр



Диалоговое окно программ, исходный код которых приведен в п. А.3.3 и А.3.4, представлено на рисунке А.3.

**Рисунок А.3 – Диалоговое окно программы, предназначенной для реализации математической модели расчета съема материала и шероховатости обработанной поверхности по параметру  $Ra$  при обработке плоскостей эластичными полимерно-абразивными кругами**

**А.3.6 Результаты расчета шероховатости обработанной поверхности по разработанной теоретической математической модели ( $RaT$ ), а также экспериментальные данные ( $RaЭ$ ) при обработке плоскостей эластичными полимерно-абразивными кругами**

Приведены в таблицах А.15–А.19.

**Таблица А.15 – Результаты расчета шероховатости для круга FS-WL 8A MED**

$V$ , м/мин	$S$ , мм/мин	$\Delta Y$ , мм	$P_y$ , Н	$RaЭ$ , мкм	$RaT$ , мкм
220,7	130	1,5	2,253	1,56	1,56
441,4			2,226	1,86	1,862
551,7			2,208	2,05	2,054
706,2			2,178	2,37	2,369
441,4	130	0,5	0,225	1,51	1,512
		1,0	0,975	1,67	1,675
		1,5	2,226	1,86	1,862
		2,0	3,976	2,08	2,085

**Таблица А.16 – Результаты расчета шероховатости для круга FS-WL 6S FIN**

<i>V</i> , м/мин	<i>S</i> , мм/мин	$\Delta Y$ , мм	<i>P<sub>y</sub></i> , Н	<i>RaЭ</i> , мкм	<i>RaT</i> , мкм
203,4	130	1,5	3,101	0,715	0,717
406,8			3,084	1,055	1,056
508,5			3,074	1,256	1,223
650,9			3,058	1,572	1,571
406,8	130	0,5	0,686	0,865	0,874
		1,0	1,599	0,959	0,965
		1,5	3,084	1,055	1,056
		2,0	5,144	1,152	1,144

**Таблица А.17 – Результаты расчета шероховатости для круга FS-WL 2S CRS**

<i>V</i> , м/мин	<i>S</i> , мм/мин	$\Delta Y$ , мм	<i>P<sub>y</sub></i> , Н	<i>RaЭ</i> , мкм	<i>RaT</i> , мкм
231,2	130	2,5	2,22	2,178	2,212
464,4			2,151	2,756	2,782
578,1			2,051	3,072	3,075
739,9			1,841	3,545	3,559
464,4	130	1,5	0,944	2,086	2,081
		2,0	1,621	2,396	2,401
		2,5	2,151	2,756	2,782
		3,0	2,532	3,165	3,242

**Таблица А.18 – Результаты расчета шероховатости для круга DB-WL 8S MED**

<i>V</i> , м/мин	<i>S</i> , мм/мин	$\Delta Y$ , мм	<i>P<sub>y</sub></i> , Н	<i>RaЭ</i> , мкм	<i>RaT</i> , мкм
232,2	130	1,5	2,62	1,239	1,238
464,3			2,489	1,526	1,526
580,4			2,419	1,663	1,663
742,9			2,318	1,848	1,849
464,4	130	0,5	0,266	1,139	1,139
		1,0	0,99	1,306	1,306
		1,5	2,489	1,526	1,526
		2,0	4,434	1,799	1,797

**Таблица А.19 – Результаты расчета шероховатости для круга CF-FB-0,5AFIN**

<i>V</i> , м/мин	<i>S</i> , мм/мин	$\Delta Y$ , мм	<i>P<sub>y</sub></i> , Н	<i>RaЭ</i> , мкм	<i>RaT</i> , мкм
303,2	130	4	1,178	1,382	1,385
606,3			1,27	1,622	1,624
757,9			1,337	1,788	1,793
970,1			1,454	2,071	2,073
606,3	130	3	0,755	1,546	1,548
		3,5	1,00	1,582	1,585
		4,0	1,27	1,622	1,624
		4,5	1,565	1,665	1,669

### А.3.7 Аппроксимирующие выражения, полученные для упрощения применения полученной теоретической математической модели формирования шероховатости обработанной поверхности в практических целях

Следует отметить, что данные уравнения справедливы только для исследованных в настоящей работе эластичных полимерно-абразивных кругов при обработке высокопрочного алюминиевого сплава В95ПчТ2:

$$Ra = \epsilon_1 \cdot \Delta Y^2 + \epsilon_2 \cdot V^2 + \epsilon_3 \cdot \Delta Y + \epsilon_4 \cdot V + \epsilon_5 \cdot \Delta Y \cdot V + \epsilon_6, \quad (A.5)$$

где  $V$  – скорость резания, м/мин;  $\Delta Y$  – деформация круга, мм.

Значения коэффициентов  $\epsilon_1 - \epsilon_5$  и свободного члена  $\epsilon_6$  уравнения (A.5) приведены в таблице А.20.

Таблица А.20 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (A.5)

Коэффициент	FS-WL 8A MED	FS-WL 6S FIN	CF-FB 0,5A FIN	DB-WL 8S MED	FS-WL 2S CRS
$\epsilon_1$	0,05326541	$2,89829 \cdot 10^{-3}$	$6,66667 \cdot 10^{-3}$	0,10613115	0,098297
$\epsilon_2$	$1,132 \cdot 10^{-6}$	$9,90857 \cdot 10^{-7}$	$6,66667 \cdot 10^{-7}$	$-1,55615 \cdot 10^{-7}$	$6,746 \cdot 10^{-7}$
$\epsilon_3$	0,03116126	$6,12533 \cdot 10^{-6}$	0,01968	0,06468923	0,0131788
$\epsilon_4$	$-1,2031 \cdot 10^{-4}$	$3,8861 \cdot 10^{-4}$	$7,31743 \cdot 10^{-5}$	$9,905 \cdot 10^{-4}$	$6,061 \cdot 10^{-4}$
$\epsilon_5$	$4,9298 \cdot 10^{-4}$	$4,53183 \cdot 10^{-4}$	$2,79289 \cdot 10^{-5}$	$2,3847 \cdot 10^{-4}$	$5,708 \cdot 10^{-4}$
$\epsilon_6$	1,20114	0,45	1,11	0,6	1,02427

### А.4 Температура в зоне обработки при зачистке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами

*Результаты расчета средней ( $\theta$ ) и локальной ( $\theta_L$ ) температуры в зоне обработке по разработанной теоретической математической модели, а также экспериментальные данные ( $\theta_{ЭК}$ ) при обработке плоскостей эластичными полимерно-абразивными кругами*

Приведены в таблицах А.21–А.25.

Таблица А.21 – Результаты расчета температуры для круга FS-WL 8A MED

$V$ , м/с	$S$ , м/мин	$\Delta Y$ , мм	Экспериментальные данные			Расчетные данные	
			$P_y$ , Н	$P_z$ , Н	$\theta_{ЭК}$ , °С	$\theta_L$ , °С	$\theta$ , °С
3,68	0,130	1,5	2,252	0,941	149,35	133,169	51,19
7,36			2,221	0,937	177,016	170,811	63,007
11,77			2,178	0,93	204,681	203,308	73,475
14,71			2,121	0,921	232,347	223,124	79,956
11,77	0,130	0,5	0,177	0,13	120,131	142,875	58,055
		1,0	0,927	0,43	162,406	152,977	58,233
		1,5	2,178	0,93	204,681	203,308	73,475
		2,0	3,928	1,63	246,956	252,395	89,52

11,77	0,042	1,5	2,208	0,936	223,55	210,8	76,549
	0,130		2,178	0,93	204,681	203,308	73,475
	0,255		2,137	0,921	177,879	183,701	67,164
	0,395		2,094	0,912	147,86	151,525	57,339

Таблица А.22 – Результаты расчета температуры для круга FS-WL 6S FIN

V, м/с	S, м/мин	$\Delta Y$ , мм	Экспериментальные данные			Расчетные данные	
			$P_y$ , Н	$P_z$ , Н	$\theta_{ЭК}$ , °С	$\theta_L$ , °С	$\theta$ , °С
3,39	0,130	1,5	3,099	1,44	95,461	92,604	39,546
6,78			3,078	1,34	143,92	131,381	51,354
10,85			3,052	1,216	192,379	191,112	69,316
13,56			3,019	1,069	240,838	230,083	80,488
10,85	0,130	1,0	1,567	0,474	152,653	174,618	61,92
		1,5	3,052	1,216	192,379	191,112	69,316
		2,0	5,111	2,246	232,105	251,381	89,588
10,85	0,042	1,5	3,053	1,217	197,101	199,596	72,374
	0,130		3,052	1,216	192,379	191,112	69,316
	0,255		3,031	1,206	185,672	177,985	65,113
	0,395		2,983	1,181	178,159	164,867	61,012

Таблица А.23 – Результаты расчета температуры для круга FS-WL 2S CRS

V, м/с	S, м/мин	$\Delta Y$ , мм	Экспериментальные данные			Расчетные данные	
			$P_y$ , Н	$P_z$ , Н	$\theta_{ЭК}$ , °С	$\theta_L$ , °С	$\theta$ , °С
3,85	0,130	2,5	2,22	1,299	97,204	96,257	40,709
7,71			2,145	1,261	132,665	127,096	50,517
12,33			1,891	1,134	168,125	168,719	63,646
15,41			1,458	0,918	203,585	211,163	76,579
12,33	0,130	1,5	0,562	0,412	124,673	121,612	49,32
		2,0	1,3	0,81	146,399	134,602	53,244
		2,5	1,891	1,134	168,125	168,719	63,646
		3,0	2,333	1,384	189,85	217,393	78,468
12,33	0,042	2,5	1,554	0,966	172,083	178,178	66,999
	0,130		1,891	1,134	168,125	168,719	63,646
	0,255		2,273	1,325	162,503	161,614	61,413
	0,395		2,567	1,472	156,206	157,41	60,127

Таблица А.24 – Результаты расчета температуры для круга DB-WL 8S MED

V, м/с	S, м/мин	$\Delta Y$ , мм	Экспериментальные данные			Расчетные данные	
			$P_y$ , Н	$P_z$ , Н	$\theta_{ЭК}$ , °С	$\theta_L$ , °С	$\theta$ , °С
3,87	0,130	1,5	2,62	1,247	129,34	129,621	49,235
7,74			2,485	1,179	163,161	167,154	60,065
12,38			2,34	1,107	196,982	200,04	69,546
15,48			2,188	1,031	230,803	216,925	76,319

Окончание таблицы А.24

12,38	0,130	0,5	0,117	0,181	80,064	96,708	39,377
		1,0	0,951	0,528	138,523	138,835	51,102
		1,5	2,34	1,107	196,982	200,04	69,546
		2,0	4,285	1,917	255,441	265,911	90,684
12,38	0,042	1,5	2,371	1,122	218,173	204,508	71,084
	0,130		2,34	1,107	196,982	200,04	69,546
	0,255		2,299	1,086	166,881	173,648	61,849
	0,395		2,254	1,064	133,168	134,814	50,711

Таблица А.25 – Результаты расчета для круга CF-FB 0,5A FIN

V, м/с	S, м/мин	$\Delta Y$ , мм	Экспериментальные данные			Расчетные данные	
			$P_y$ , Н	$P_z$ , Н	$\theta_{Эж}$ , °С	$\theta_L$ , °С	$\theta$ , °С
5,236	130	4	1,18	0,54	24,964	26,73	19,873
10,472			1,28	0,76	37,09	32,942	21,831
16,755			1,476	1,217	43,153	39,504	24,095
20,944			1,656	1,638	51,64	42,753	25,356
16,755	130	3	0,964	1,009	29,414	31,043	29,576
		3,5	1,208	1,107	33,252	34,608	22,609
		4,0	1,476	1,217	37,09	39,504	24,095
		4,5	1,77	1,4	40,929	43,279	25,267
16,755	42	4	1,5925	1,244	39,71	39,168	24,092
	130		1,476	1,217	37,09	39,504	24,095
	255		1,298	1,158	33,368	36,948	23,233
	395		1,078	1,06	29,199	30,736	21,349

*Аппроксимирующие выражения, полученные для упрощения применения полученной теоретической математической модели температуры в зоне обработки в практических целях*

Следует отметить, что данные уравнения справедливы только для исследованных в настоящей работе эластичных полимерно-абразивных кругов при обработке высокопрочного алюминиевого сплава В95ПчТ2:

$$\Theta = a_1 \cdot \Delta Y^2 + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot S^2 + a_4 \cdot \Delta Y \cdot V + a_5 \cdot \Delta Y \cdot S + a_6 \cdot V \cdot S + a_7 \cdot \Delta Y \cdot V \cdot S + a_8, \quad (A.6)$$

где  $V$  – скорость резания, м/мин;  $\Delta Y$  – деформация круга, мм;  $S$  – продольная подача, мм/мин.

Значения коэффициентов  $a_{1-7}$  и свободного члена  $a_8$  данного уравнения приведены в таблице А.26.

**Таблица А.26 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (А.6)**

<b>Коэф- фици- ент</b>	<b>FS-WL 8A MED</b>	<b>FS-WL 6S FIN</b>	<b>FS-WL 2S CRS</b>	<b>DB-WL 8S MED</b>	<b>CF-FB 0,5A FIN</b>
$a_1$	44,5699	24,261806	16,5461	42,983733	5,60395
$a_2$	0,0621162	0,0941789	0,055208	-0,067316	0,04105625
$a_3$	-0,1961227	-0,1797811	$-6,45944 \cdot 10^{-3}$	-0,317812	-0,0968395
$a_4$	0,0603936	0,0594147	0,0402005	0,141986	$-1,02969 \cdot 10^{-3}$
$a_5$	0,115684	$2,95092 \cdot 10^{-3}$	$-4,10002 \cdot 10^{-3}$	0,0589903	0,01319605
$a_6$	$1,8293 \cdot 10^{-5}$	$-3,69861 \cdot 10^{-5}$	$-1,3454 \cdot 10^{-5}$	$5,40267 \cdot 10^{-4}$	$-2,62375 \cdot 10^{-5}$
$a_7$	$-1,93126 \cdot 10^{-4}$	$1,39442 \cdot 10^{-4}$	$-1,0616 \cdot 10^{-5}$	$-3,71007 \cdot 10^{-4}$	$1,24465 \cdot 10^{-5}$
$a_8$	57,7678	33,405333	22,5513	60,857133	-3,851095

### **А.5 Анализ состояния поверхностного слоя деталей после обработки эластичными полимерно-абразивными инструментами**

Для установления причины потемнения образцов из алюминиевого сплава В95пчТ2 были проведены исследования поверхностного слоя на металлографическом микроскопе Микромед МЕТ-2, а также на электронном микроскопе Jeol JIB-Z4500, оснащенного детектором Oxford X-max (программное обеспечение INCA Point ID).

#### ***Оптический металлографический Микроскоп Микромед МЕТ-2***

Микромед МЕТ-2 (см. рисунок 3.42) предназначен для визуального наблюдения микроструктуры металлов, сплавов и других непрозрачных объектов в отраженном свете при прямом освещении в светлом, а также для исследования объектов в поляризованном свете [141].

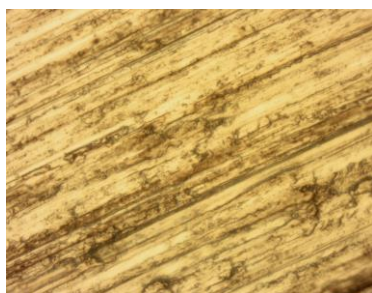
Согласно [141], микроскоп применяется для контроля качества металлов и сплавов и исследования их структуры. Инвертированное строение позволяет исследовать габаритные объекты. Фокусировка осуществляется за счет перемещения по вертикали револьверного устройства, а не предметного столика. Предметный столик двукоординатный – перемещение объекта осуществляется не при помощи накладного препаратоводителя (как в модели Микромед МЕТ-1), а за счет перемещения всего столика в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, что обеспечивает точность перемещения [141]. Столик предусматривает перемещение объекта до 2 кг [141].

Характеристики Микромед МЕТ-2, представленные на ресурсе [141], а также приведенные в его паспорте, приведены в таблице А.27.

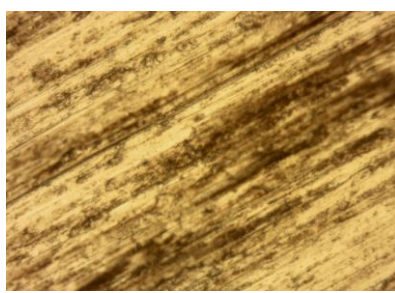
**Таблица А.27 – Характеристики Микромед МЕТ-2 [141]**

<b>Параметры</b>	<b>Значения</b>
Увеличение микроскопа, крат	50-2500
Визуальная насадка	бинокулярная
Угол наклона визуальной насадки, град	45
Регулируемое межзрачковое расстояние, в пределах, мм	53-75
Увеличение насадки	1
Окуляры	широкопольные с удаленным зрачком 10/22; 15/15; 20/12; 25/10
Револьверное устройство	на 5 объективов
Тип коррекции объективов	длиннофокусные планахроматы, рассчитаны на длину тубуса "бесконечность"
Объективы	5х/0,12; 10х/0,25; 20х/0,4; 50х/0,70; 100х/0,85
Предметный столик, мм	242х200
Диапазон перемещения препарата, мм	30х30
Конденсорное устройство	предусматривает работу в светлом поле
Источник света - галогеновая лампа, В/Вт	6/30
Источник питания - сеть переменного тока, В/Гц	220+-22/50
Габаритные размеры, мм	614х394х250
Масса, не более, кг	10

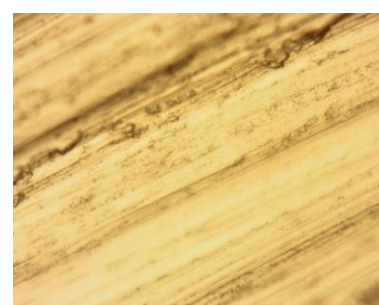
Результаты исследования состояния поверхностного слоя на образцах обработанных торцевыми щетками Scotch-Brite™ Bristle BD-ZB (см. главу 5) приведены на рисунке А.4.



Щетка: Scotch-Brite™  
Bristle BD-ZB P120  
Режимы:  $n=500 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $\Delta Y=1,5 \text{ мм}$ ;  
 $S=130 \text{ мм/мин}$

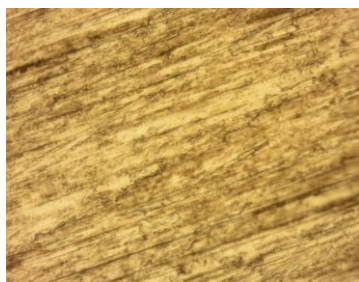


Щетка: Scotch-Brite™  
Bristle BD-ZB P120  
Режимы:  $n=1600 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $\Delta Y=1,5 \text{ мм}$ ;  
 $S=130 \text{ мм/мин}$

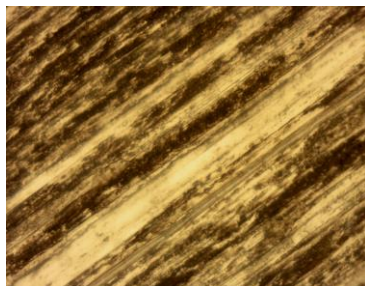


Щетка: Scotch-Brite™ Bristle  
BD-ZB P50  
Режимы:  $n=1600 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $\Delta Y=1,5 \text{ мм}$ ;  
 $S=130 \text{ мм/мин}$

**Рисунок А.4 – Снимки поверхностей, полученных на металлографическом микроскопе Микромед МЕТ-2, после обработки торцевыми щетками Scotch-Brite™ Bristle BD-ZB Bristle**



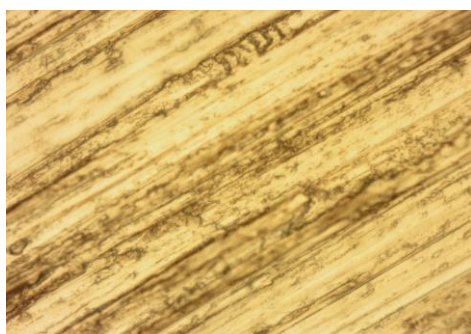
Щетка: Scotch-Brite™  
Bristle BD-ZB P120  
Режимы:  $n=1000 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $\Delta Y=1 \text{ мм}$ ;  
 $S=130 \text{ мм/мин}$



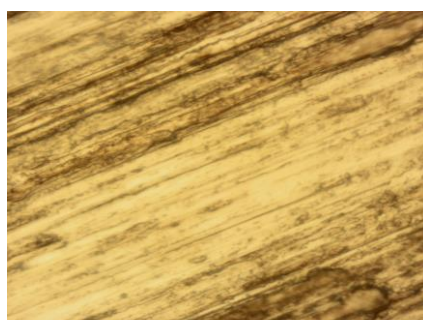
Щетка: Scotch-Brite™  
Bristle BD-ZB P120  
Режимы:  $n=1000 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $\Delta Y=2 \text{ мм}$ ;  
 $S=130 \text{ мм/мин}$



Щетка: Scotch-Brite™  
Bristle BD-ZB P50  
Режимы:  $n=500 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $\Delta Y=1,5 \text{ мм}$ ;  
 $S=130 \text{ мм/мин}$



Щетка: Scotch-Brite™  
Bristle BD-ZB P120  
Режимы:  $n=1000 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $\Delta Y=1,5 \text{ мм}$ ;  
 $S=82 \text{ мм/мин}$



Щетка: Scotch-Brite™  
Bristle BD-ZB P120  
 $n=1000 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $\Delta Y=1,5 \text{ мм}$ ;  
 $S=395 \text{ мм/мин}$

#### Рисунок А.4 – Окончание

***Растровый электронный микроскоп JIB-Z4500 Multibeam с ионной пушкой для  
микротравления, оснащенный детектором Oxford X-max  
(программное обеспечение INCA Point ID)***

Растровый электронный микроскоп JIB-Z4500 Multibeam показан на рисунке 3.43.

Основные характеристики и отличительные особенности системы [109]: повышенная производительность при большой площади травления (максимальный ионный ток травления 30 нА); обеспечивает получение стабильного изображения для травления/мониторинга процесса травления через длительные интервалы времени, наличие стандартной низковакуумной системы для исследования непроводящих образцов.

Микроскоп оснащен детекторами: вторичных электронов, отражённых электронов.

Новая простая в эксплуатации система РЭМ/ФИП объединяет в себе ионную оптику и самую популярную в мире колонну РЭМ. РЭМ JIB-4500 Multibeam обеспечивает высокую производительность в различных вариантах применения, от наблюдения образцов до их ионного микротравления [109].



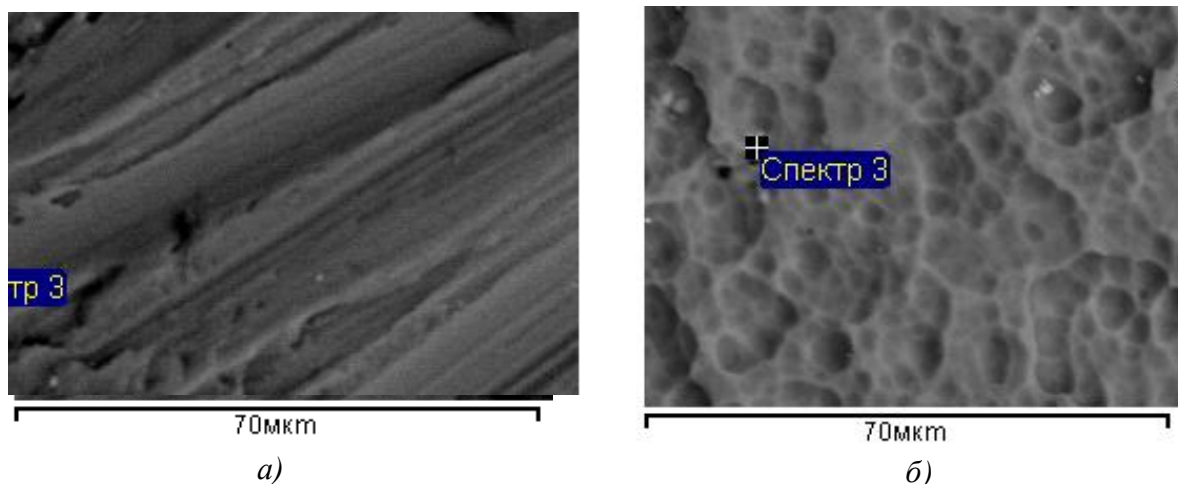
Характеристики растрового электронного микроскопа JIB-Z4500 Multibeam, представленные на ресурсе [109], а также в его паспорте, приведены в таблице А.28.

**Таблица А.28 – Характеристики растрового электронного микроскопа**

**JIB-Z4500 Multibeam [109]**

<b>Параметры</b>	<b>Значения</b>
Тип источника электронов	Гексаборид-лантановый катод (LaB6)
Низковакуумный режим	есть
Пространств. разрешение	2,5 нм при 30 кВ ускоряющего
Энергия электронного луча	от 0,3 до 30 кэВ
Увеличение	от 5 до 300 000 крат
Ток луча	1 мкА максимум
Детекторы	Детектор вторичных электронов, детектор отражённых электронов
Аналитические приставки - опции	Система энергодисперсионного микроанализа, система волнодисперсионного микроанализа, система текстурного анализа поликристаллических образцов, спектральный анализ катодолюминесценции, охлаждающие (крио) и нагревающие столики образцов
Система вакуумной откачки	2 гетероионных насоса, турбомолекулярный насос, 2 форвакуумных насоса
Система шлюзования	есть
Источник ионов	Жидкометаллический источник ионов галлия
Пространственное разрешение при сканировании ионным пучком	5 нм при 30 кВ ускоряющего
Ускоряющее напряжение ионной пушки	от 1 до 30 кВ
Увеличение при сканировании ионным пучком	30 крат (для широкого поля зрения), от 100 до 300 000 крат
Максимальный ток ионной пушки	30 нА при 30 кВ ускоряющего напряжения
Дополнительное оборудование	Инфракрасная телекамера в камере образцов, система инъекции газа для прецизионного электронно-стимулированного напыления под электронным пучком

На рисунке А.5 показаны снимки поверхностей, обработанных торцевыми щетками Scotch-Brite™ Bristle BD-ZB, полученные на электронном микроскопе JIB-Z4500 Multibeam, не протравленные и протравленные в 20%-ном водном растворе NaOH ( и осветленные в 20%-ном водном растворе HNO<sub>3</sub>). Результаты спектрального анализа приведены в таблице А.29. Анализируя данные результаты можно сделать вывод о том, что содержание кислорода в результате обработки существенно увеличилось. Аналогичные результаты были получены при обработке поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами (см. главу 3, п. 3.7).



**Рисунок А.5 – Снимки поверхностей, полученные на электронном микроскопе JIB-Z4500 Multibeam, после обработки торцевыми щетками Scotch-Brite™ Bristle BD-ZB:**

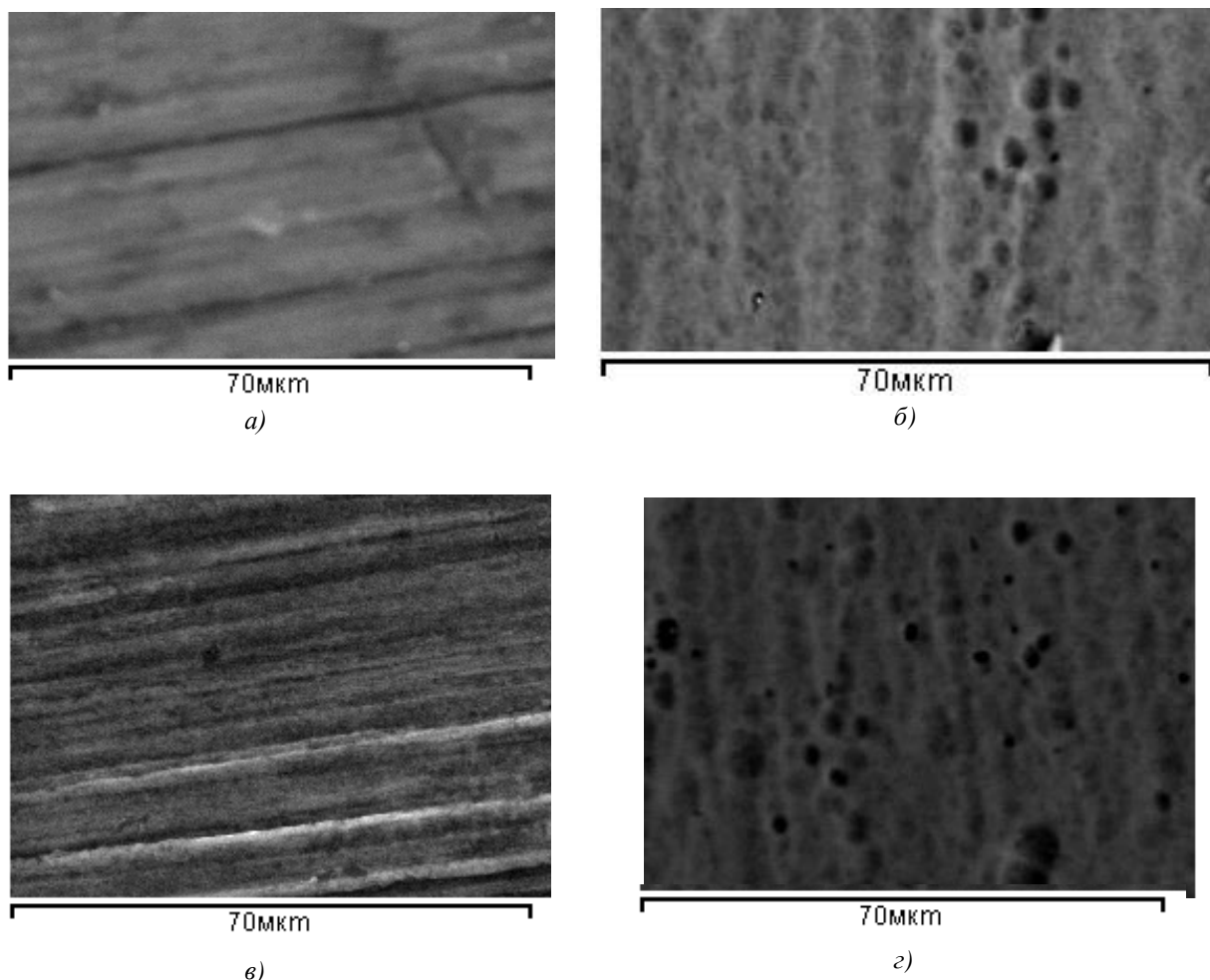
*а)* – зернистость щетки P50,  $n=1000$  об/мин,  $\Delta Y=1,5$  мм,  $S=395$  мм/мин. Образец травлению не подвергался.

*б)* – зернистость щетки P80,  $n=1600$  об/мин,  $\Delta Y=1,5$  мм,  $S=130$  мм/мин. Образец подвергался травлению при помощи NaOH – 20%, HNO<sub>3</sub> 20%.

**Таблица А.29 – Химический состав поверхностного слоя образцов, обработанных торцевыми щетками**

Образец	Электронное изображение в электронах:	C	O	Mg	Al	Si	Cr	Fe	Mn	Cu	Zn
Обработан, не протравлен (см. рисунок А.7, <i>а</i> )	вторичных	15,47	2,36	2,03	73,92	–	–	–	0,35	1,15	4,72
	отраженных max	11,32	24,77	2,05	77,56	–	–	21,54	1,27	1,86	5,19
	отраженных min	9,63	2,18	1,18	39,56	–	–	4,71	0,18	0,24	1,81
Обработан, протравлен (см. рисунок А.7, <i>б</i> )	вторичных	15,07	1,55	1,99	74,67	0,21	–	–	0,28	1,31	4,92
	отраженных max	14,19	2,75	0,88	66,10	1,07	1,18	19,76	5,60	6,14	5,75
	отраженных min	3,77	0,66	0,57	51,21	0,29	0,25	12,47	3,59	4,15	2,55

На рисунке А.6 показаны снимки поверхностей образцов, обработанных эластичными полимерно-абразивными кругами, полученные на электронном микроскопе JIB-Z4500 Multibeam, не подвергавшиеся травлению и протравленные в 20%-ном водном растворе NaOH и осветленные в 20%-ном водном растворе HNO<sub>3</sub>. Результаты спектрального анализа приведены в таблицах А.30 и А.31. После обработки, как и в предыдущем случае, отмечается увеличенное содержание кислорода



**Рисунок А.6 – Снимки поверхностей, полученные при помощи электронного микроскопа JIB-Z4500 Multibeam, после обработки эластичными полимерно-абразивными кругами:**

- а)* – DB-WL 8SMED при  $V=479,09$  м/мин,  $\Delta Y=2$  мм,  $S=130$  мм/мин. Травлению не подвергался.  
*б)* – FS-WL-8AMED при  $V=461,81$  м/мин,  $\Delta Y=1,5$  мм,  $S=130$  мм/мин. Протравлен: NaOH – 20%,  $HNO_3$  – 20%.  
*в)* – DB-WL-7SFIN при  $V=478,46$  м/мин,  $\Delta Y=2$  мм,  $S=130$  мм/мин. Травлению не подвергался.  
*г)* – FS-WL-6SFIN при  $V=469,67$  м/мин,  $\Delta Y=1,5$  мм,  $S=395$  мм/мин. Протравлен: NaOH – 20%,  $HNO_3$  – 20%.

**Таблица А.30 – Химический состав поверхностного слоя образцов, обработанных эластичными полимерно-абразивными кругами**

Образец	Электронное изображение в электронах:	C	O	Mg	Al	Si	Cr	W	Mn	Cu	Zn
Обработан, не протравлен (см. рисунок А.8, <i>а</i> )	вторичных	10,15	14,71	2,00	67,17	0,33	0,21	–	0,30	1,02	4,10
	отраженных <i>max</i>	6,98	23,85	2,17	73,45	0,59	–	10,53	0,34	1,00	4,29
	отраженных <i>min</i>	6,52	11,93	1,50	52,72	0,37	–	10,53	0,24	0,69	2,99
Обработан, протравлен (см. рисунок А.8, <i>б</i> )	вторичных	19,68	2,13	1,80	70,46	–	–	–	0,41	1,07	4,46
	отраженных	8,74	1,16	2,01	81,60	–	–	–	0,31	1,26	4,92

**Таблица А.31 – Химический состав поверхностного слоя образцов, обработанных полимерно-абразивными кругами**

<b>Образец</b>	<b>Электронное изображение в электронах:</b>	<b>C</b>	<b>O</b>	<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>
Обработан, не протравлен (см. рисунок А.8, в)	вторичных	26,96	17,87	1,34	49,70	0,29	–	–	0,22	0,66	2,95
	отраженных max	7,69	30,51	1,56	60,89	1,99	0,86	8,54	2,68	3,28	3,20
	отраженных min	5,94	11,18	0,97	57,53	1,47	0,56	7,28	0,23	0,80	2,55
Обработан, протравлен (см. рисунок А.8, г)	вторичных	26,00	1,63	1,73	64,97	0,28	–	–	0,29	1,03	4,06
	отраженных max	13,40	1,52	1,90	78,58	2,99	2,00	9,97	4,83	3,16	5,18
	отраженных min	10,77	1,52	0,86	62,79	2,99	0,33	8,58	1,94	1,39	2,06

## Приложение Б – Обработка кромок полимерно-абразивными инструментами

### Б.1 Методика проведения измерений шероховатости на поверхности скругленных кромок при помощи оптического профилометра Bruker Contour GT-KI

Используя программное обеспечение Vision64, из списка выбирается доступная линза и масштаб увеличения. В меню Measurement (Сканирование) задается глубина сканирования в мкм (рисунок Б.1), затем задается длина измерения и параметры сшивки (рисунок Б.2). Далее осуществляется выбор длины трассы (например 2 мм) и задаются параметры сшивки (Stitching) (например 6 равных участков). Таким образом, при оценке результатов получаем среднее арифметическое значение на этих 6 равных участках при общей длине измерения 2 мм.

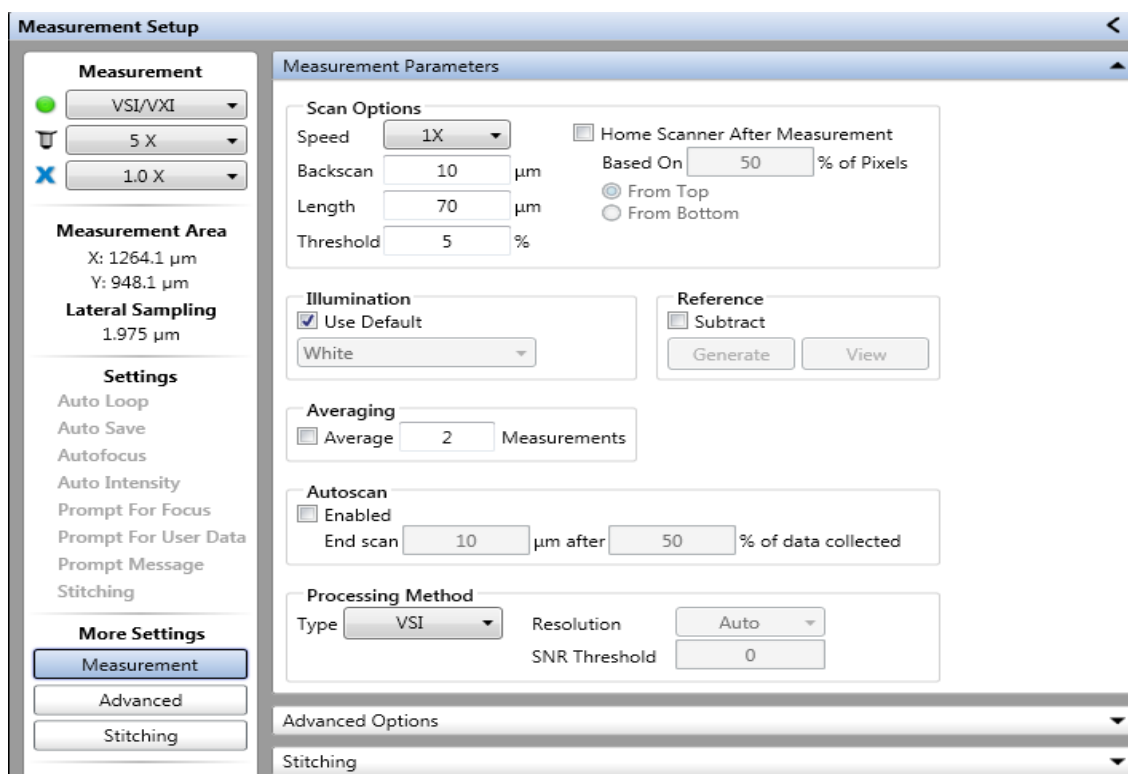
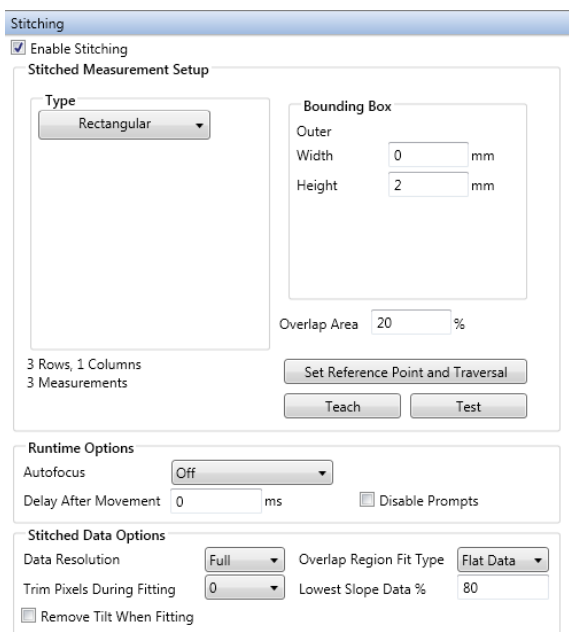


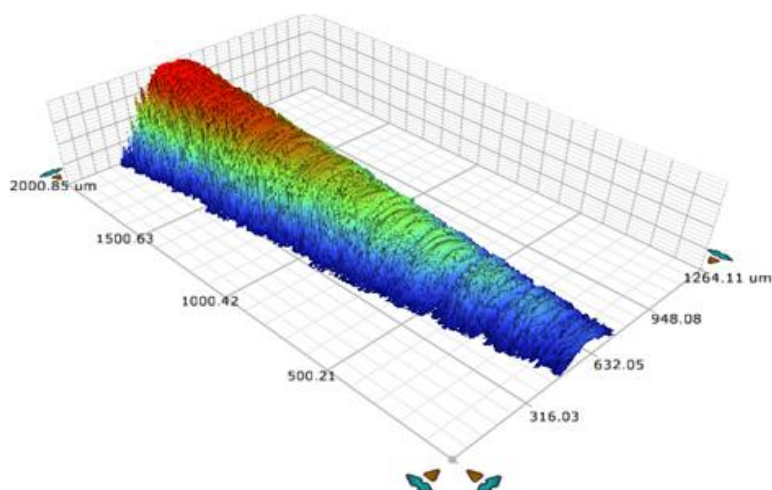
Рисунок Б.1 – Настройка параметров сканирования

После проведения сканирования, получаем 3D-изображение искомой поверхности, пример которого приведен на рисунке Б.3.

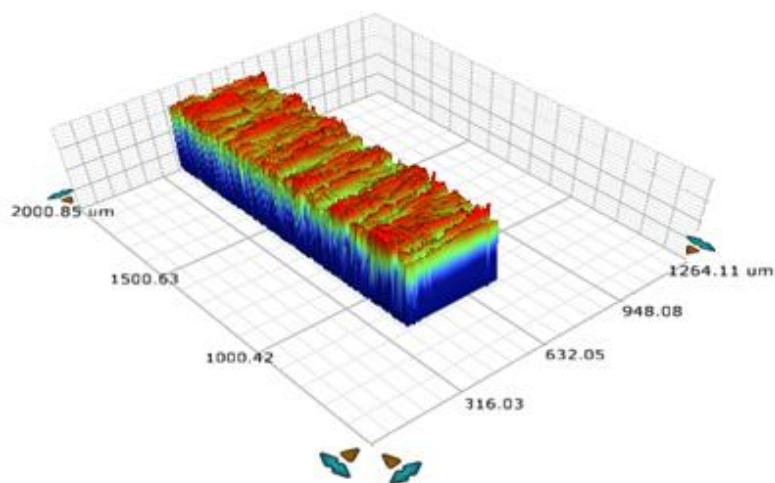


**Рисунок Б.2 – Настройка параметров сшивки**

Чтобы получить реальную картину микронеровностей необходимо применить следующие фильтры: Mask Data (обрезка), Data Restore (удаление «черных точек», т.е. не просканированных участков), Terms Removal - Cylinder and Tilt (позволяет развернуть радиус в плоскость с целью получения реальной картины микронеровностей). После применения данных фильтров 3D-модель поверхности примет вид, показанный на рисунке Б.4.



**Рисунок Б.3 – 3D изображение отсканированной поверхности**



**Рисунок Б.4 – 3D изображение отсканированной поверхности после применения фильтров**

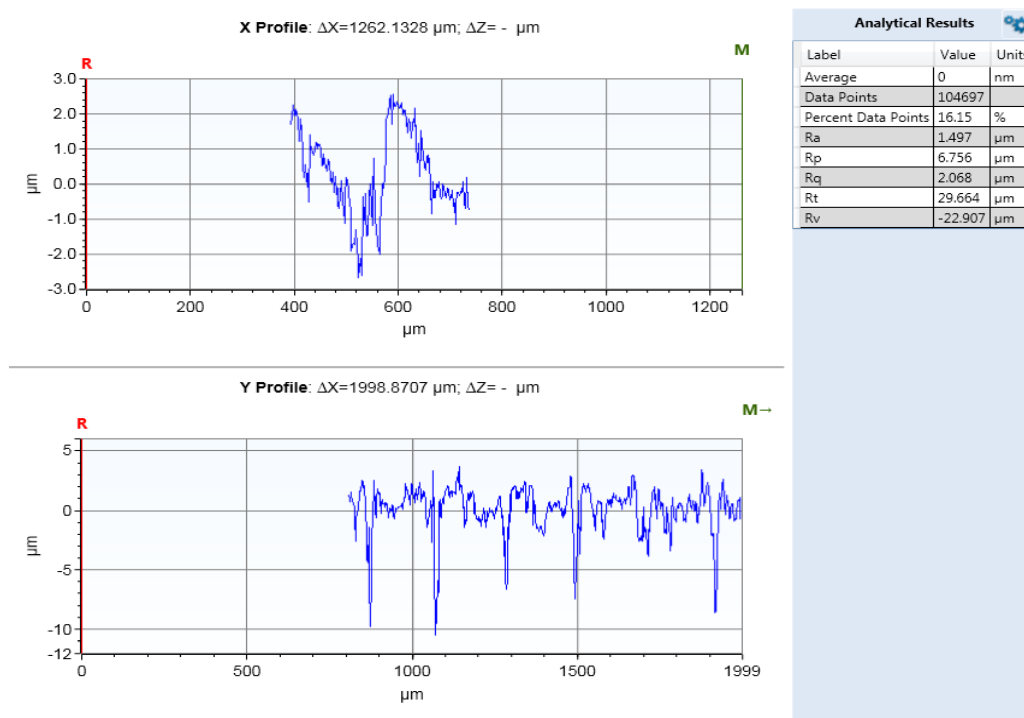
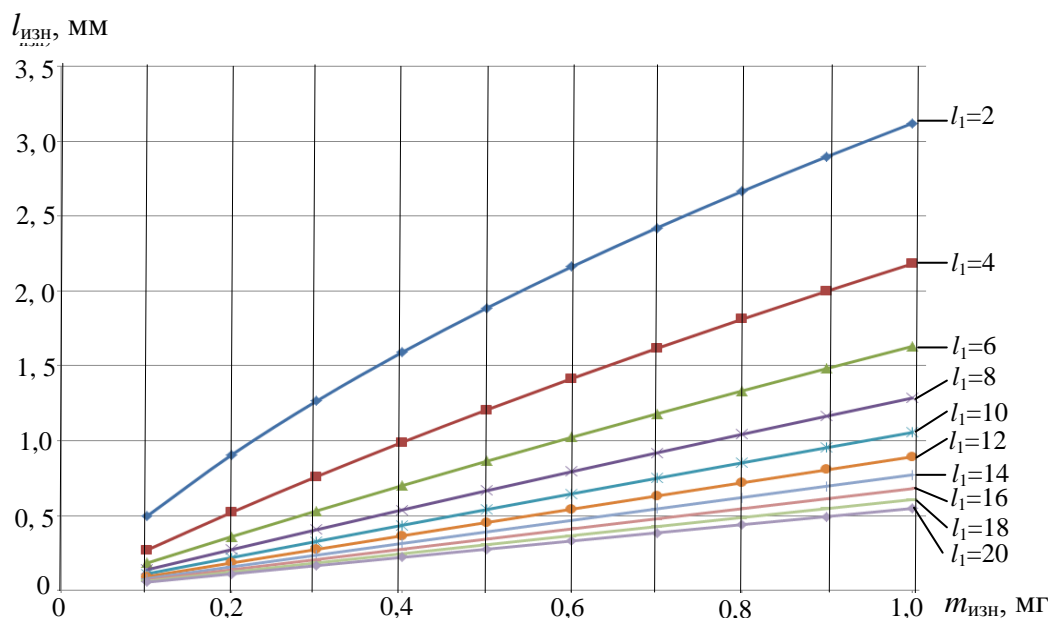


Рисунок Б.5 – Профилограмма отсканированной поверхности и базовые параметры шероховатости

## Б.2 Износ ворсин эластичных полимерно-абразивных щеток при обработке кромок

Таблица Б.1 – Износ ворсины  $l_{изн}$  для щетки радиальной ВВ-ZB Type C при  $\gamma_в = 1,6 \text{ мг/мм}^3$ ,  $K_{дл} = 0,05625 \text{ мм}$

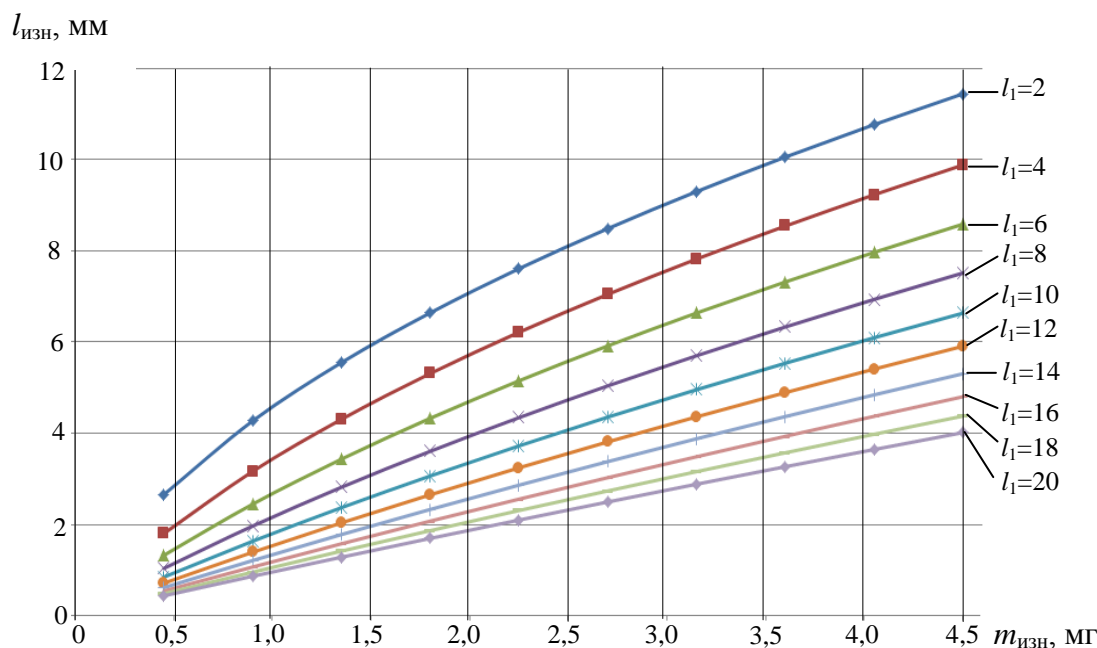
$l_1, \text{ мм}$	$m_{изн}, \text{ мг}$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	$l_{изн} \cdot \text{ мм}$									
2	0,4944	0,9059	1,266	1,5901	1,8873	2,1633	2,4222	2,6667	2,899	3,1208
4	0,2687	0,5216	0,761	0,9889	1,2068	1,416	1,6174	1,8119	2	2,1824
6	0,1824	0,3596	0,532	0,6999	0,8638	1,0238	1,1802	1,3333	1,4833	1,6303
8	0,1377	0,2731	0,4063	0,5375	0,6667	0,7939	0,9194	1,0431	1,1652	1,2856
10	0,1105	0,2198	0,328	0,435	0,5409	0,6458	0,7497	0,8525	0,9545	1,0554
12	0,0922	0,1838	0,2746	0,3648	0,4544	0,5433	0,6315	0,7192	0,8062	0,8927
14	0,0791	0,1578	0,2361	0,3139	0,3914	0,4684	0,5449	0,6211	0,6969	0,7723
16	0,0693	0,1383	0,207	0,2754	0,3435	0,4114	0,4789	0,5462	0,6132	0,68
18	0,0616	0,123	0,1842	0,2452	0,306	0,3666	0,427	0,4872	0,5472	0,607
20	0,0555	0,1108	0,166	0,221	0,2759	0,3306	0,3852	0,4396	0,4939	0,548



**Рисунок Б.6 –  
Графики для  
определения  $l_{изн}$   
по заданным  $m_{изн}$   
и  $l_1$  для радиаль-  
ной щетки ВВ-ZB  
Type C**

**Таблица Б.2 – Износ ворсины  $l_{изн}$  для щетки радиальной ВВ-ZB Type A  
при  $\gamma_e = 1,6 \text{ мг/мм}^3$ ,  $K_{дл} = 0,031818 \text{ мм}$**

$l_1, \text{ мм}$	$m_{изн}, \text{ мг}$									
	0,45	0,90	1,35	1,80	2,25	2,70	3,15	3,60	4,05	4,5
	$l_{изн}, \text{ мм}$									
2	2,656	4,2735	5,5522	6,6438	7,6121	8,4915	9,3027	10,059	10,771	11,446
4	1,8033	3,1664	4,3088	5,3121	6,2173	7,0486	7,8216	8,5471	9,2328	9,8848
6	1,3266	2,4473	3,4359	4,3303	5,1532	5,9194	6,6393	7,3203	7,9681	8,5872
8	1,0376	1,9678	2,8183	3,6067	4,3448	5,0412	5,7022	6,3328	6,9368	7,5173
10	0,848	1,6343	2,3708	3,0658	3,7256	4,3552	4,9583	5,538	6,0968	6,6369
12	0,7153	1,3924	2,037	2,6531	3,2445	3,8137	4,3631	4,8947	5,41	5,9105
14	0,6178	1,2104	1,7809	2,3314	2,864	3,3802	3,8816	4,3693	4,8443	5,3077
16	0,5432	1,0692	1,5794	2,0753	2,5578	3,0282	3,4872	3,9356	4,3742	4,8035
18	0,4846	0,9567	1,4174	1,8674	2,3075	2,7382	3,1601	3,5738	3,9797	4,3783
20	0,4372	0,8652	1,2846	1,696	2,0996	2,496	2,8856	3,2686	3,6455	4,0164



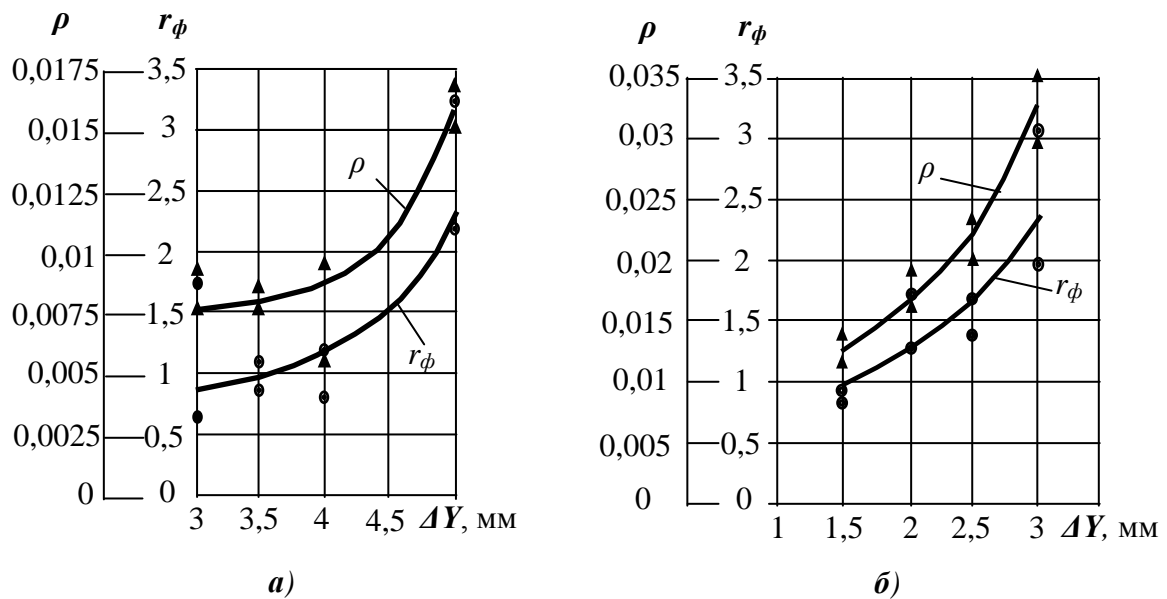
**Рисунок Б.7 –  
Графики для  
определения  
 $l_{изн}$   
по заданным  
 $m_{изн}$  и  $l_1$  для  
радиальной  
щетки ВВ-ZB  
Type A**



**Таблица Б.3 – Расчетное время работы щетки до корректировки натяга  
инструмента  $\Delta Y$  при  $l_1 = 2$  мм**

Щетка	Износ $I$ по (4.29)		Износ $l_{изн}$ , мм				
	$I_{min}$ , мг/мин	$I_{max}$ , мг/мин	0,20	0,35	0,5	0,65	0,8
			Время обработки $T_{изн}$ , мин				
ВВ-ZB Type C P120	1,5		1,701	3,083	4,556	6,121	7,776
		11	0,232	0,42	0,621	0,835	1,06
ВВ-ZB Type C P220	2,1		1,215	2,202	3,254	4,372	5,554
		9,5	0,269	0,487	0,719	0,966	1,228
ВВ-ZB Type C P400	1,7		1,501	2,72	4,02	5,4	6,861
		7,8	0,327	0,592	0,876	1,177	1,495
ВВ-ZB Type A P36	2,2		0,437	0,793	1,171	1,574	1,999
		40	0,024	0,044	0,064	0,086	0,11
ВВ-ZB Type A P50	2,2		0,437	0,793	1,171	1,574	1,999
		32	0,03	0,054	0,081	0,108	0,137

**Б.3 Зависимости фактического радиуса скругления кромки ( $r_\phi$ ) и относительного снятого слоя кромки ( $\rho$ ) от режимных параметров обработки при скруглении острых кромок эластичными полимерно-абразивными кругами**



Режимы обработки те же, что и на рисунке 4.43.

**Рисунок Б.8 – Зависимости фактического радиуса скругления ( $r_\phi$ ) и относительного снятого слоя кромки одним миллиметром ширины инструмента ( $\rho$ ) от деформации  $\Delta Y$ :**

*a* – для круга CF-FB 0,5A FIN; *б* – для круга FS-WL 2S CRS;  
*в* – для круга CB-ZS P180; *г* – для круга FF-ZS ACRS.

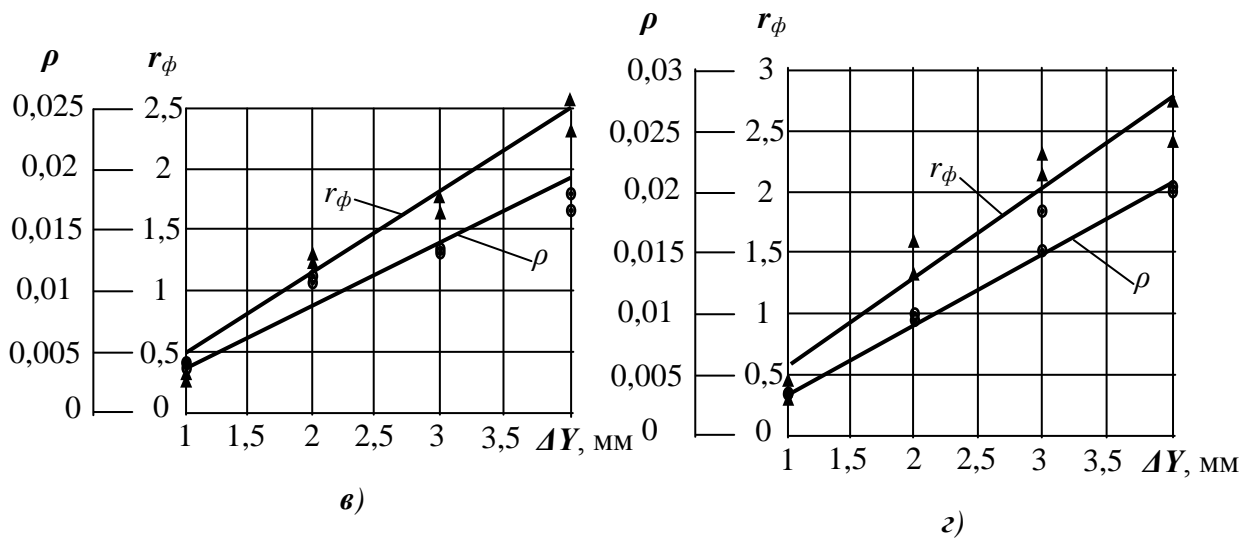
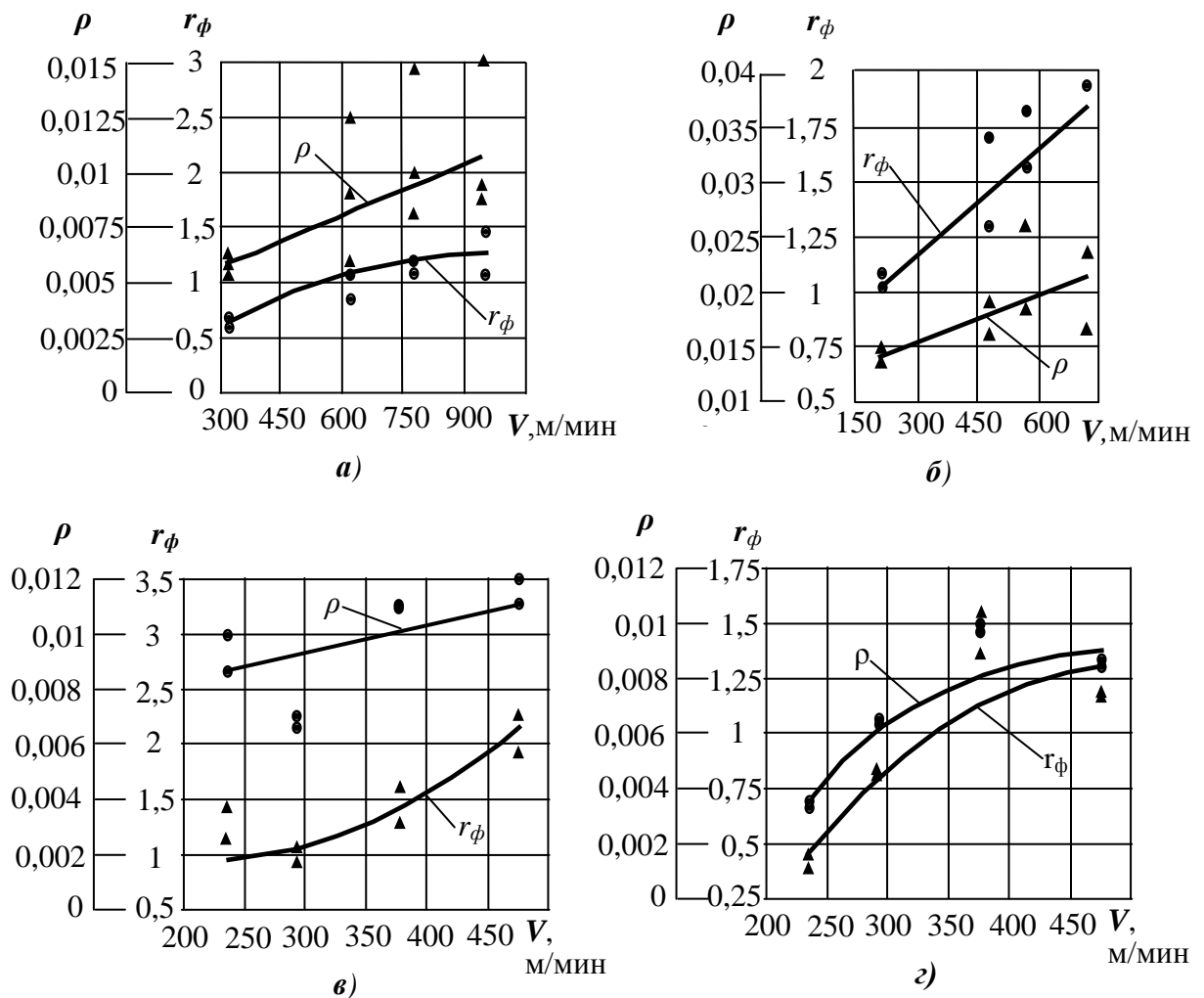


Рисунок Б.8 – Окончание

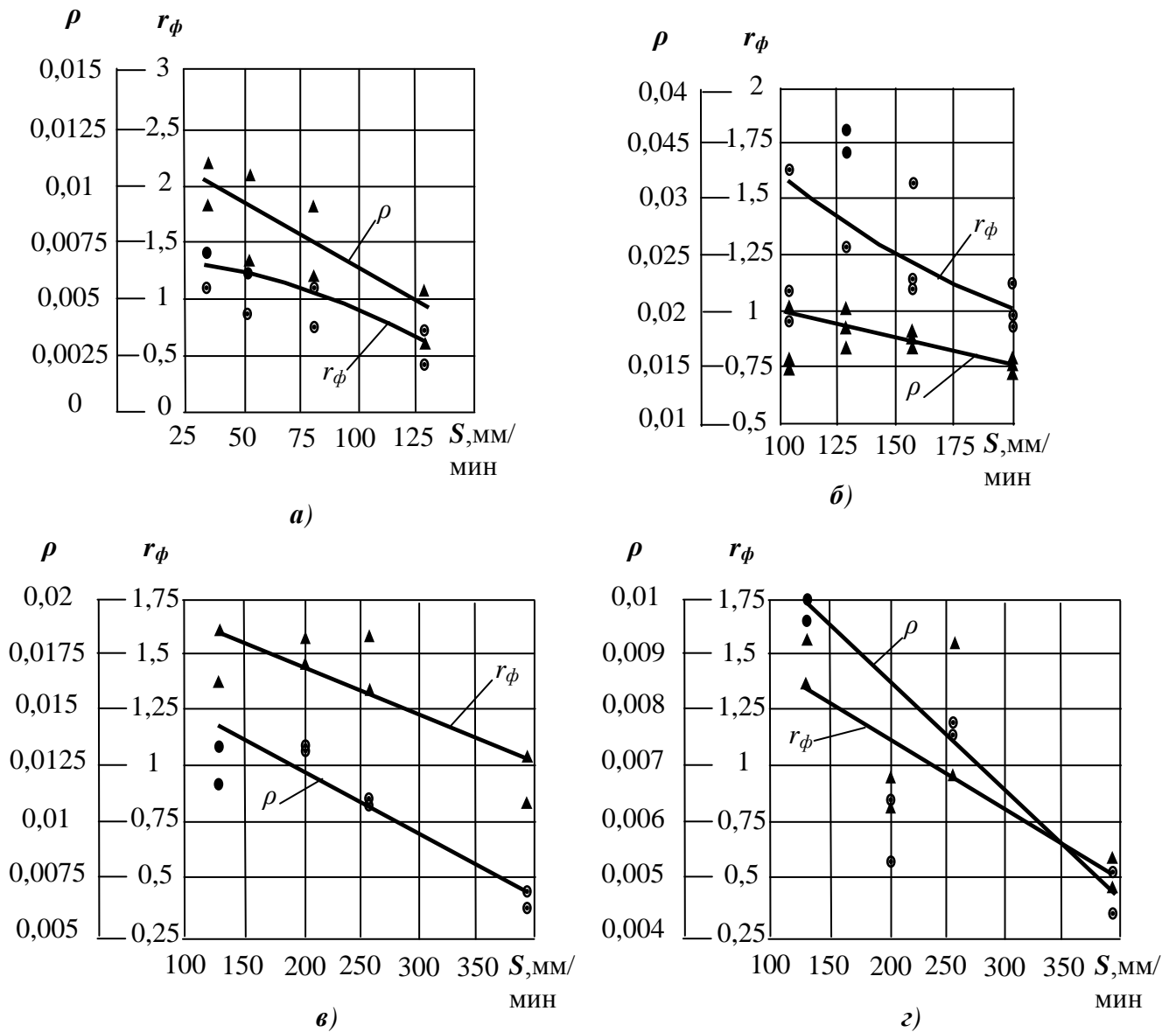


Режимы обработки те же, что и на рисунке 4.44.

Рисунок Б.9 – Зависимости фактического радиуса скругления ( $r_\phi$ ) и относительного снятого слоя кромки одним миллиметром ширины инструмента ( $\rho$ ) от скорости  $V$ :

$a$  – для круга CF-FB 0,5A FIN;  $б$  – для круга FS-WL 2S CRS;

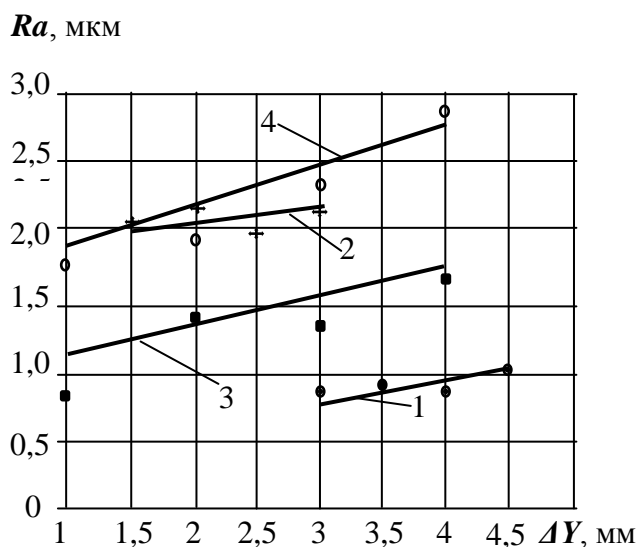
$в$  – для круга CB-ZS P180;  $г$  – для круга FF-ZS ACRS.



**Рисунок Б.10 – Зависимости фактического радиуса скругления ( $r_\phi$ ) и относительного снятого слоя кромки одним миллиметром ширины инструмента ( $\rho$ ) от подачи  $S$ :**

- а) – Круг CF-FB 0,5A FIN при  $\Delta Y=4$  мм,  $V=606,3$  м/мин,  $\alpha=27,8^\circ$ ;
- б) – Круг FS-WL 2S CRS при  $\Delta Y=2$  мм,  $V=462,4$  м/мин,  $\alpha=26,2^\circ$ ;
- в) – Круг CB-ZS P180 при  $\Delta Y=2$  мм,  $V=377$  м/мин,  $\alpha=16,26^\circ$ ;
- з) – Круг FF-ZS ACRS при  $\Delta Y=2$  мм,  $V=377$  м/мин,  $\alpha=16,26^\circ$ .

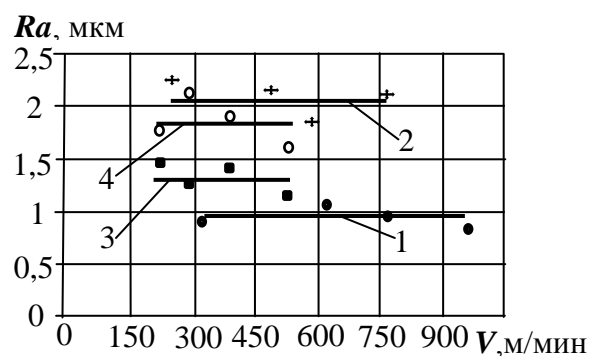
## Б.4 Зависимости шероховатости на поверхности скругленных кромок от режимных параметров обработки при скруглении острых кромок эластичными полимерно-абразивными кругами



- 1 – для круга CF-FB 0,5A FIN;
- 2 – для круга FS-WL 2S CRS;
- 3 – для круга CB-ZS P180;
- 4 – для круга FF-ZS ACRS.

Режимы обработки те же, что и на рисунке 4.43.

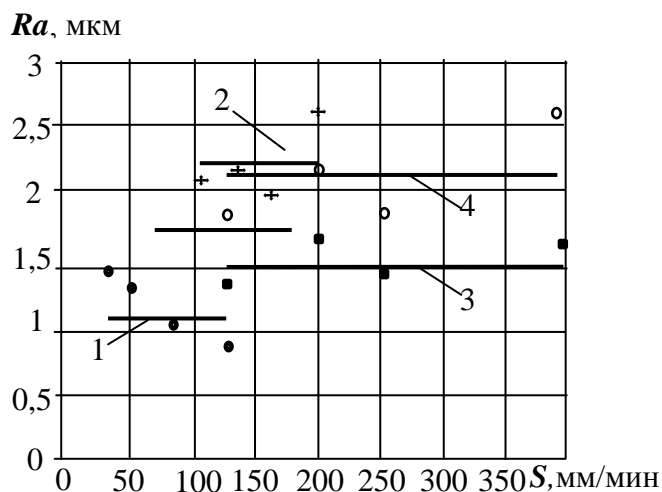
**Рисунок Б.11 – Зависимость шероховатости  $Ra$  от деформации  $\Delta Y$**



- 1 – для круга CF-FB 0,5A FIN;
- 2 – для круга FS-WL 2S CRS;
- 3 – для круга CB-ZS P180;
- 4 – для круга FF-ZS ACRS.

Режимы обработки те же, что и на рисунке 4.44.

**Рисунок Б.12 – Зависимость шероховатости  $Ra$  от скорости  $V$**



- 1 – для круга CF-FB 0,5A FIN; 2 – для круга FS-WL 2S CRS;
- 3 – для круга CB-ZS P180; 4 – для круга FF-ZS ACRS.

Режимы обработки те же, что и на рисунке Б.10 п. Б.3 (приложение Б).

**Рисунок Б.13 – Зависимость шероховатости  $Ra$  от подачи  $S$**

## Приложение В – Обработка поверхностей и кромок торцевыми полимерно-абразивными щетками

### В.1 Результаты теоретического расчета сил $P_x$ , $P_y$ и $P_z$ (а также упругие и ударные составляющие $P_{yn}$ и $P_{y\delta}$ ) и экспериментальные данные при обработке кромок

**Таблица В.1 – Значения сил в зависимости от частоты вращения щетки для сплава В95пчТ2 при  $\Delta Y=2$  мм,  $S=130$  мм/мин,  $A=0$  мм**

n, об/ мин	Экспериментальные, Н			Расчетные, Н								
	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$P_x$			$P_y$			$P_z$		
				$P_x$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_y$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_z$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$
500	22,56	34,02	20,42	22,558	0,0086	22,55	40,508	39,374	1,134	20,434	10,678	9,757
1000	24,67	46,31	22,96	24,997	0,0043	24,992	46,31		6,937	26,92	10,673	16,247
1600	27,72	71,12	27,46	27,718	0,0027	27,715	71,12		31,747	27,481	10,672	16,809
2000	30,07	93,78	31,36	30,067	0,0021	30,065	93,777		54,404	31,401	10,671	20,73

**Таблица В.2 – Значения сил в зависимости от частоты вращения щетки для сплава ВТ20 при  $\Delta Y=2$  мм,  $S=42$  мм/мин,  $A=0$  мм**

n, об/ мин	Экспериментальные, Н			Расчетные, Н								
	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$P_x$			$P_y$			$P_z$		
				$P_x$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_y$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_z$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$
500	27,35	38,49	14,35	27,351	0,0028	27,349	42,638	39,374	3,265	14,356	10,672	3,684
1000	29,02	50,66	16,53	27,771	0,0014	27,769	56,66		17,287	17,505	10,67	6,835
1600	32,34	69,66	21,06	32,343	0,0009	32,342	69,659		30,286	21,094	10,67	10,425
2000	38,69	85,00	25,23	38,697	0,0007	38,696	84,999		45,626	25,277	10,67	14,607

**Таблица В.3 – Значения сил в зависимости от деформации щетки для сплава В95пчТ2 при  $n=1600$  об/мин,  $S=130$  мм/мин,  $A=0$  мм**

$\Delta Y$ , мм	Экспериментальные, Н			Расчетные, Н								
	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$P_x$			$P_y$			$P_z$		
				$P_x$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_y$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_z$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$
1	23,83	54,81	22,34	23,824	0,0018	23,822	61,16	61,046	0,114	22,364	7,137	15,227
2	27,72	71,12	27,46	27,718	0,0027	27,715	71,12	39,374	31,747	27,481	10,672	16,809
3	34,74	96,98	32,21	35,706	0,0033	35,703	96,98	31,362	65,618	32,234	13,263	18,971
4	44,89	132,36	36,59	44,886	0,004	44,882	132,35	26,947	105,401	36,819	15,364	21,455

**Таблица В.4 – Значения сил в зависимости от деформации щетки для сплава ВТ20 при  $n=1600$  об/мин,  $S=42$  мм/мин,  $A=0$  мм**

$\Delta Y$ , мм	Экспериментальные, Н			Расчетные, Н								
	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$P_x$			$P_y$			$P_z$		
				$P_x$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_y$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_z$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$
1	29,34	60,7	17,05	29,342	0,0006	29,342	61,294	61,046	0,248	17,081	7,136	9,945
2	32,34	69,66	20,97	32,343	0,0009	32,342	69,659	39,374	30,286	21,094	10,67	10,425
3	39,94	84,37	26,73	40,6	0,0011	40,599	84,37	31,362	53,008	26,773	13,26	13,513
4	50,71	104,81	30,07	50,723	0,0013	50,721	104,81	26,947	77,864	32,819	15,361	17,458

**Таблица В.5 – Значения сил в зависимости от подачи щетки  
для сплава В95пчТ2 при  $n=1600$  об/мин,  $\Delta Y=2$  мм,  $A=0$  мм**

$S$ , мм/ мин	Экспериментальные, Н			Расчетные, Н								
	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$P_x$			$P_y$			$P_z$		
				$P_x$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_y$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_z$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$
82	26,81	68,84	24,45	26,81	0,0017	26,808	68,838	39,374	29,465	25,637	10,671	14,967
130	27,72	71,12	27,46	27,718	0,0027	27,715	71,12		31,747	27,481	10,672	16,809
255	31,81	81,91	33,18	33,335	0,0053	33,329	87,11		47,736	30,67	10,674	19,996
395	39,36	102,27	35,93	39,322	0,008	39,314	102,273		62,899	32,671	10,677	21,994

**Таблица В.6 – Значения сил в зависимости от подачи щетки  
для сплава ВТ20 при  $n=1600$  об/мин,  $\Delta Y=2$  мм,  $A=0$  мм**

$S$ , мм/ мин	Эксперименталь- ные, Н			Расчетные, Н								
	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$P_x$			$P_y$			$P_z$		
				$P_x$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_y$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_z$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$
13	35,18	66,39	20,79	35,187	0,0003	35,187	66,388	39,374	27,015	20,977	10,669	10,308
42	36,00	69,66	21,06	32,343	0,0009	32,342	69,659		30,286	21,094	10,67	10,425
82	37,37	79,02	21,83	37,518	0,0017	37,517	89,187		49,813	21,47	10,671	10,799
130	39,39	97,65	23,39	39,397	0,0027	39,395	97,651		58,277	22,2	10,672	11,529

**Таблица В.7 – Значения сил в зависимости от смещения щетки  
для сплава В95пчТ2 при  $n=1600$  об/мин,  $\Delta Y=1,5$  мм,  $S=82$ мм/мин**

$A$ , мм	Экспериментальные, Н			Расчетные, Н								
	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$P_x$			$P_y$			$P_z$		
				$P_x$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_y$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_z$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$
0	24,48	59,49	21,94	24,48	0,0015	24,479	59,491	46,445	13,046	23,32	9,142	14,179
22	20,11	51,01	19,79	20,112	0,0015	20,111	51,009	21,898	29,11	19,792	7,323	12,47
30	17,28	44,64	18,09	17,281	0,0015	17,28	44,638	22,49	22,148	18,093	6,184	11,908
38	13,79	36,53	15,9	11,502	0,0015	11,501	37,099	22,212	14,887	16,939	4,825	12,114
46	9,64	26,67	13,21	9,675	0,0015	9,673	26,667	18,479	8,189	13,211	3,023	10,189

**Таблица В.8 – Значения сил в зависимости от смещения щетки  
для сплава ВТ20 при  $n=1600$  об/мин,  $\Delta Y=1,5$  мм,  $S=42$ мм/мин**

$A$ , мм	Экспериментальные, Н			Расчетные, Н								
	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$P_x$			$P_y$			$P_z$		
				$P_x$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_y$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_z$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$
0	33,70	74,46	18,84	33,697	0,0007	33,696	73,12	46,445	26,675	18,882	9,141	9,742
22	30,21	72,8	17,7	30,211	0,0007	30,21	72,88	27,798	45,082	17,745	7,322	10,422
30	28,14	70,04	16,37	28,151	0,0007	28,15	70,039	27,089	42,95	16,413	6,184	10,229
38	25,65	66,64	14,66	26,528	0,0007	26,527	68,766	25,304	43,461	15,878	4,824	11,053
46	22,73	62,6	12,56	22,796	0,0007	22,795	55,586	19,817	35,769	12,601	3,022	9,578

## В.2 Аппроксимирующие выражения, полученные для упрощения применения полученной теоретической математической модели силового взаимодействия ворсин торцевых полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой кромкой в практических целях

Следует отметить, что данные уравнения справедливы только для исследованных в настоящей работе торцевых полимерно-абразивных щеток при обработке высокопрочного алюминиевого сплава В95ПчТ2 и титанового сплава ВТ20:

$$P_{X,Y,Z} = b_1 \cdot \Delta Y^2 + b_2 \cdot n^2 + b_3 \cdot S^2 + b_4 \cdot A^3 + b_5 \cdot A^2 + b_6 \cdot \Delta Y + b_7 \cdot n + b_8 \cdot S + b_9 \cdot A + b_{10} \cdot \Delta Y \cdot n + b_{11} \cdot \Delta Y \cdot S + b_{12} \cdot \Delta Y \cdot A + b_{13} \cdot n \cdot S + b_{14} \cdot n \cdot A + b_{15} \cdot S \cdot A + b_{16} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot S + b_{17} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot A + b_{18} \cdot S \cdot n \cdot A + b_{19} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot S \cdot A + b_{20}. \quad (B.1)$$

Значения коэффициентов и свободного члена в (B.1) для средних значений сил щеток BD-ZB Bristle™ P50, BD-ZB Bristle™ P80, BD-ZB Bristle™ P120 приведены в таблице В.9.

**Таблица В.9 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (B.1)**

Кoeffици- ент и своб. член	Сила $P_x$		Сила $P_y$		Сила $P_z$	
	В95ПчТ2	ВТ20	В95ПчТ2	ВТ20	В95ПчТ2	ВТ20
$b_1$	0,8	0,8	4	1,6	0,6	0,2
$b_2$	$1 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$
$b_3$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$
$b_4$	$-8,15 \cdot 10^{-4}$	$-9,73 \cdot 10^{-4}$	$-1,82 \cdot 10^{-3}$	$-2,55 \cdot 10^{-3}$	$-8,07 \cdot 10^{-4}$	$-6,9 \cdot 10^{-4}$
$b_5$	0,0377	0,05	0,0936	0,1456	0,0434	0,03715
$b_6$	3	3,5	5	7	1,5	3,5
$b_7$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,01	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
$b_8$	0,02	0,04	$5 \cdot 10^{-3}$	0,04	0,03	0,02
$b_9$	-0,2126	-0,5545	-1,0992	-1,9058	-0,536	-0,4345
$b_{10}$	$3,169 \cdot 10^{-7}$	$3,169 \cdot 10^{-7}$	$3,169 \cdot 10^{-7}$	$3,169 \cdot 10^{-7}$	$3,169 \cdot 10^{-7}$	$3,169 \cdot 10^{-7}$
$b_{11}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
$b_{12}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$	$2,857 \cdot 10^{-10}$
$b_{13}$	$5,333 \cdot 10^{-10}$	$5,333 \cdot 10^{-10}$	$5,333 \cdot 10^{-10}$	$5,333 \cdot 10^{-10}$	$5,333 \cdot 10^{-10}$	$5,333 \cdot 10^{-10}$
$b_{14}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$
$b_{15}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$	$-6,358 \cdot 10^{-9}$
$b_{16}$	$1,829 \cdot 10^{-8}$	$1,829 \cdot 10^{-8}$	$1,829 \cdot 10^{-8}$	$1,829 \cdot 10^{-8}$	$1,829 \cdot 10^{-8}$	$1,829 \cdot 10^{-8}$
$b_{17}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$	$2,343 \cdot 10^{-8}$
$b_{18}$	$-6,577 \cdot 10^{-10}$	$-6,577 \cdot 10^{-10}$	$-6,577 \cdot 10^{-10}$	$-6,577 \cdot 10^{-10}$	$-6,577 \cdot 10^{-10}$	$-6,577 \cdot 10^{-10}$
$b_{19}$	$2,857 \cdot 10^{-11}$	$2,857 \cdot 10^{-11}$	$2,857 \cdot 10^{-11}$	$2,857 \cdot 10^{-11}$	$2,857 \cdot 10^{-11}$	$2,857 \cdot 10^{-11}$
$b_{20}$	8	12	-5	13	10	3

### В.3 Результаты экспериментального исследования влияния режимных параметров обработки на производительность $Z_k$ при обработке кромок

Таблица В.10 – Зависимость размера кромки  $Z_k$  от частоты вращения при  $\Delta Y = 2$  мм,  $S = 130$  мм/мин,  $A = 0$

$n$ , об/мин	Материал В95пчТ2 при $S=130$ мм/мин			Материал ВТ20 при $S=42$ мм/мин		
	Р120	Р80	Р50	Р120	Р80	Р50
500	0,366	0,23	0,252	0,278	0,204	0,207
1000	0,471	0,331	0,27	0,461	0,306	0,256
1600	0,684	0,497	0,308	0,82	0,519	0,397
2000	0,878	0,635	0,342	1,144	0,714	0,54

Таблица В.11 – Зависимость размера кромки  $Z_k$  от деформации щетки  $\Delta Y$  при  $n = 1600$  об/мин,  $S = 130$  мм/мин,  $A = 0$

$\Delta Y$ , мм	Материал В95пчТ2 при $S=130$ мм/мин			Материал ВТ20 при $S=42$ мм/мин		
	Р120	Р80	Р50	Р120	Р80	Р50
1	0,566	0,303	0,214	0,39	0,345	0,214
2	0,684	0,497	0,308	0,82	0,519	0,397
3	0,782	0,726	0,453	1,17	0,809	0,672
4	0,86	0,99	0,65	1,44	1,214	1,042

Таблица В.12 – Зависимость размера кромки  $Z_k$  от подачи щетки  $S$  при  $n = 1600$  об/мин,  $\Delta Y = 2$  мм,  $A = 0$

$S$ , мм/мин	Материал В95пчТ2			Материал ВТ20		
	Р120	Р80	Р50	Р120	Р80	Р50
13	–	–	–	1,328	0,77	0,722
42	–	–	–	0,82	0,519	0,397
82	0,815	0,516	0,378	0,396	0,309	0,142
130	0,684	0,497	0,308	0,31	0,267	0,135
255	0,39	0,432	0,192	–	–	–
395	0,143	0,331	0,174	–	–	–

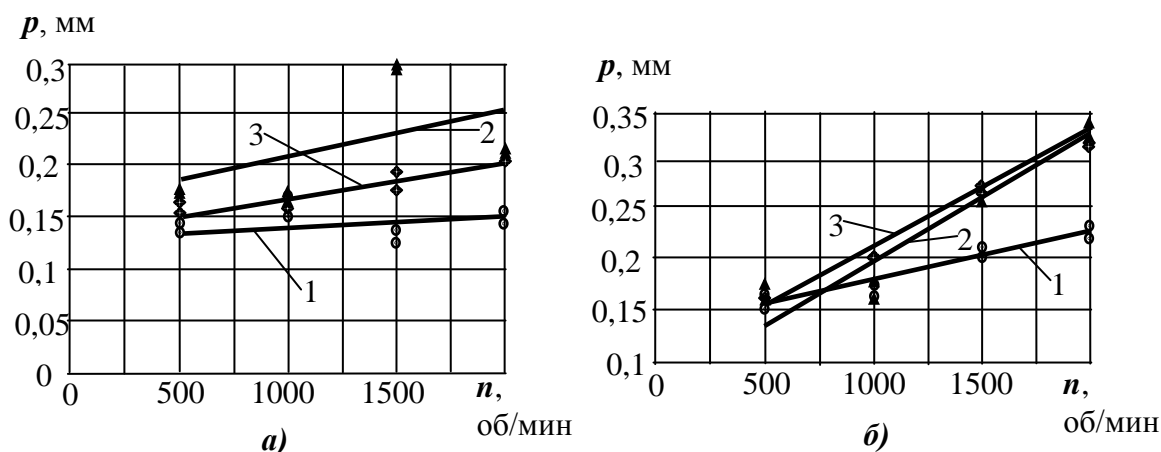
### В.4 Результаты экспериментального исследования влияния режимных параметров обработки на производительность $p$ при обработке кромок

Производительность процесса по параметру  $p$  (см. рисунок 5.13) в зависимости от частоты вращения торцевой щетки приведена на рисунке В.1 и таблице В.13.

Таблица В.13 – Зависимость размера кромки  $p$  (мм) от частоты вращения при  $\Delta Y = 2$  мм,  $A = 0$

$n$ , об/мин	Материал В95пчТ2 при $S=130$ мм/мин			Материал ВТ20 при $S=42$ мм/мин		
	Р120	Р80	Р50	Р120	Р80	Р50
500	0,162	0,151	0,177	0,133	0,123	0,157
1000	0,17	0,167	0,183	0,180	0,171	0,181
1600	0,187	0,199	0,193	0,263	0,252	0,217
2000	0,202	0,229	0,203	0,334	0,320	0,245





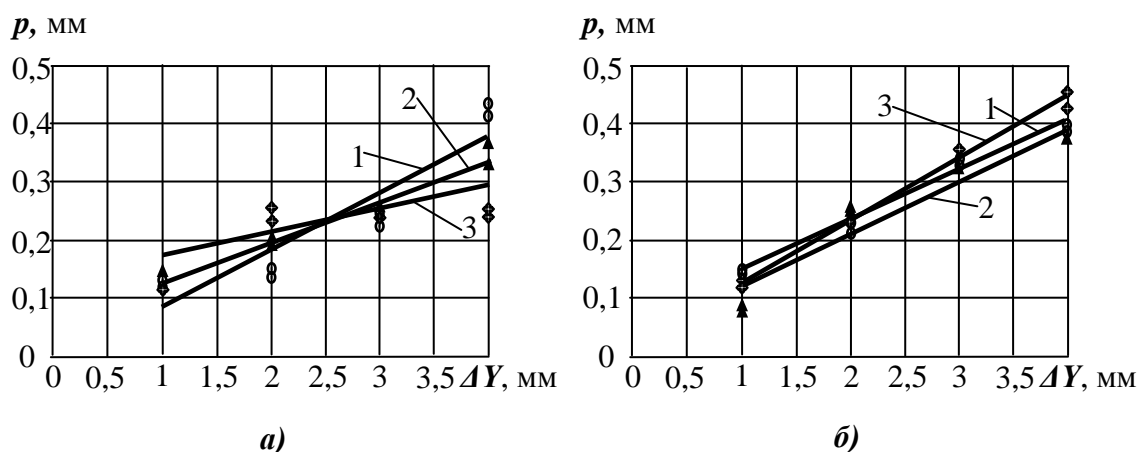
1 – P50; 2 – P80; 3 – P120.

**Рисунок В.1 – Зависимости  $p$  от частоты вращения  $n$  для торцевых щеток ВD-ZВ при  $\Delta Y = 2$  мм: а – материал В95пчТ2, подача  $S = 130$  мм/мин; б – материал ВТ20, подача  $S = 42$  мм/мин**

Зависимость  $p$  от деформации щетки представлена на рисунке В.2 и таблице В.14.

**Таблица В.14 – Зависимость размера кромки  $p$  (мм) от деформации щетки  $\Delta Y$  при  $n = 1600$  об/мин,  $A = 0$**

$\Delta Y$ , мм	Материал В95пчТ2 при $S=130$ мм/мин			Материал ВТ20 при $S=42$ мм/мин		
	P120	P80	P50	P120	P80	P50
1	0,141	0,146	0,124	0,184	0,102	0,151
2	0,187	0,199	0,193	0,263	0,252	0,217
3	0,234	0,269	0,283	0,357	0,351	0,299
4	0,282	0,354	0,392	0,467	0,401	0,398



1 – P50; 2 – P80; 3 – P120.

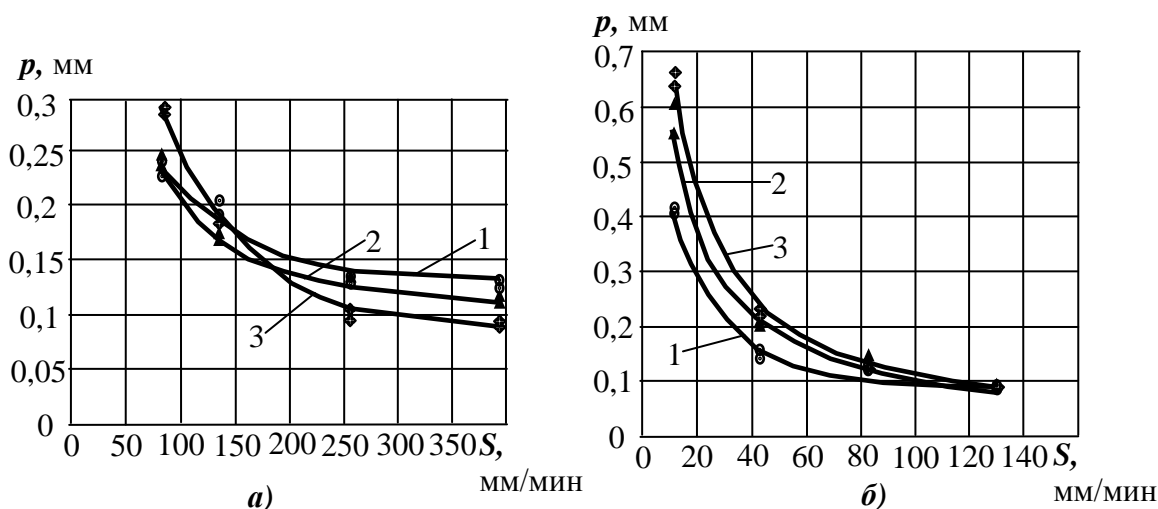
**Рисунок В.2 – Зависимости  $p$  от деформации инструмента  $\Delta Y$  для торцевых щеток ВD-ZВ при  $n = 1600$  об/мин: а – материал В95пчТ2, подача  $S = 130$  мм/мин; б – материал ВТ20 подача  $S = 42$  мм/мин**

Зависимость  $p$  от подачи представлена на рисунке В.3 и таблице В.15.

**Таблица В.15 – Зависимость размера кромки  $p$  (мм) от подачи щетки  $S$**

при  $n = 1600$  об/мин,  $\Delta Y = 2$  мм,  $A = 0$

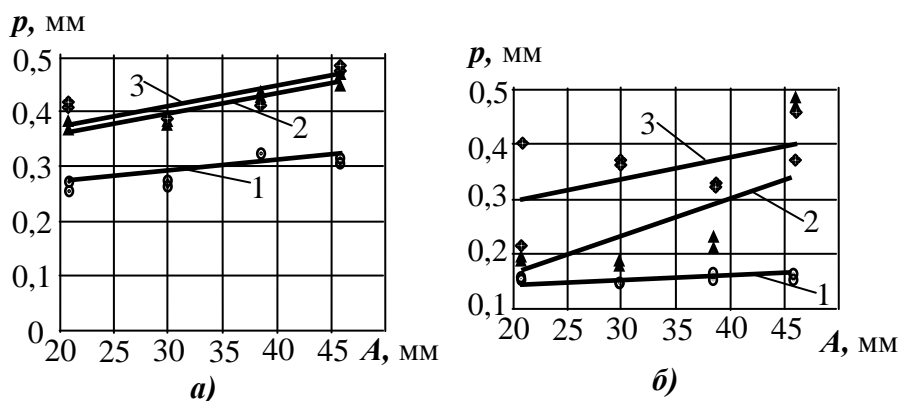
$S$ , мм/мин	Материал В95пчГ2			Материал ВТ20		
	P120	P80	P50	P120	P80	P50
13	–	–	–	0,425	0,433	0,362
42	–	–	–	0,263	0,252	0,217
82	0,236	0,226	0,202	0,124	0,109	0,103
130	0,187	0,199	0,193	0,090	0,103	0,097
255	0,106	0,150	0,169	–	–	–
395	0,094	0,132	0,137	–	–	–



1 – P50; 2 – P80; 3 – P120.

**Рисунок В.3 – Зависимости  $p$  от подачи  $S$  для торцевых щеток ВD-ZB при  $n = 1600$  об/мин,  $\Delta Y = 2$  мм: а – материал В95пчГ2; б – материал ВТ20**

Производительность процесса по параметру  $p$  в зависимости от расположения щетки относительно обрабатываемой кромки приведена на рисунке В.4 и в таблице В.16.



1 – P50; 2 – P80; 3 – P120.

**Рисунок В.4 – Зависимость  $p$  от смещения относительно оси  $A$  для щеток ВD-ZB: а – материал В95пчГ2 при  $n = 1600$  об/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм,  $S = 82$  мм/мин; б – материал ВТ20 при  $n = 1600$  об/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм,  $S = 42$  мм/мин**

**Таблица В.16 – Зависимость размера кромки  $r$  (мм) от смещения  $A$**

**при  $n = 1600$  об/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм**

$A$ , мм	Материал В95пчТ2 при $S=82$ мм/мин			Материал ВТ20 при $S=42$ мм/мин		
	Р120	Р80	Р50	Р120	Р80	Р50
22	0,316	0,298	0,238	0,272	0,226	0,189
30	0,369	0,349	0,267	0,314	0,285	0,194
38	0,431	0,408	0,296	0,370	0,367	0,200
46	0,502	0,476	0,327	0,438	0,472	0,208

**В.5 Результаты экспериментального исследования влияния режимных параметров обработки на температуру в зоне обработки при скруглении кромок**

**Таблица В.17 – Зависимость температуры в °С от частоты вращения щетки при  $\Delta Y = 2$  мм**

$n$ , об/мин	Материал В95пчТ2, $S=130$ мм/мин			Материал ВТ20, $S=42$ мм/мин		
	Р120	Р80	Р50	Р120	Р80	Р50
500	24,83	24,24	26,60	36,93	36,26	29,56
1000	23,87	24,07	28,71	35,83	36,03	30,89
1600	23,74	24,50	28,15	37,27	36,97	32,38
2000	28,06	25,73	28,55	60,36	47,78	32,80

**Таблица В.18 – Зависимость температуры в °С от деформации щетки при  $n = 1600$  об/мин**

$\Delta Y$ , мм	Материал В95пчТ2, $S=130$ мм/мин			Материал ВТ20, $S=42$ мм/мин,		
	Р120	Р80	Р50	Р120	Р80	Р50
1	20,23	21,55	20,86	30,93	24,78	21,38
2	26,72	25,09	27,19	45,29	42,18	33,25
3	36,43	34,21	36,56	65,12	60,59	49,34
4	44,99	46,62	46,01	75,58	60,85	60,05

**Таблица В.19 – Зависимость температуры в °С от подачи при  $\Delta Y = 2$  мм и  $n = 1600$  об/мин**

$S$ , мм/мин	Материал В95пчТ2			Материал ВТ20		
	Р120	Р80	Р50	Р120	Р80	Р50
13	–	–	–	37,15	29,13	27,77
42	–	–	–	41,63	34,69	29,56
82	23,63	23,49	23,45	48,19	41,24	48,04
130	22,74	24,43	25,49	53,38	42,15	35,76
255	24,44	25,02	29,45	–	–	–
395	25,26	26,14	31,28	–	–	–

Таблица В.20 – Зависимость температуры в °С от смещения кромки при  $\Delta Y = 1,5$  мм  
и  $n = 1600$  об/мин

A, мм	Материал В95пчГ2, S=82 мм/мин:			Материал ВГ20, S=42 мм/мин		
	P120	P80	P50	P120	P80	P50
22	21,89	20,35	20,44	21,89	34,09	27,84
30	22,60	22,69	22,66	22,60	39,50	27,81
38	22,18	20,39	22,03	22,18	43,77	32,32
46	21,36	20,48	21,15	21,36	35,38	28,23

### В.6 Износ ворсин торцевых щеток при обработке кромок

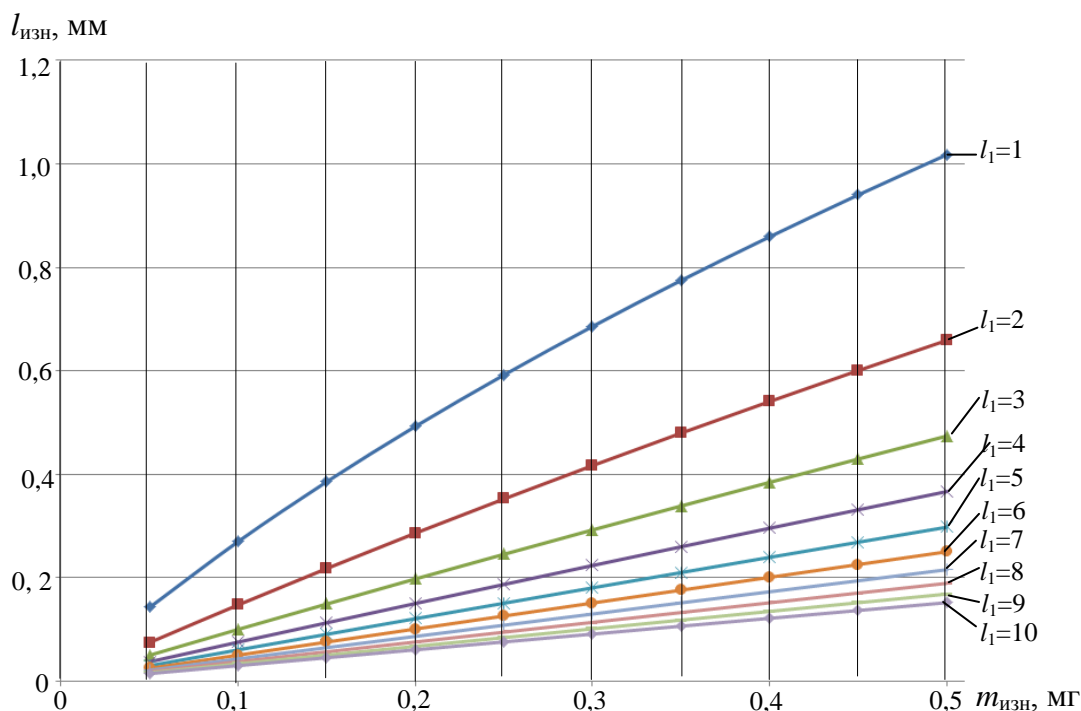


Рисунок В.5 – Графики для определения  $l_{изн}$  по заданным  $m_{изн}$  и  $l_1$  для торцевой щетки BD-ZB Bristle

Таблица В.21 – Износ ворсины  $l_{изн}$  для щетки торцевой BD-ZB Bristle при  $\gamma_в = 1,6$  мг/мм<sup>3</sup>,  $K_{дл} = 0,2035$  мм

$l_1$ , мм	$m_{изн}$ , мг									
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
	$l_{изн}$ , мм									
1	0,1433	0,2705	0,3861	0,4928	0,5924	0,686	0,7748	0,8593	0,9401	1,0177
2	0,0754	0,1481	0,2184	0,2866	0,3528	0,4172	0,4799	0,5411	0,6008	0,6592
3	0,0508	0,1007	0,1498	0,1982	0,2459	0,2928	0,3391	0,3848	0,4299	0,4744
4	0,0382	0,0761	0,1136	0,1507	0,1876	0,2241	0,2603	0,2962	0,3318	0,3671
5	0,0306	0,0611	0,0913	0,1214	0,1513	0,181	0,2106	0,2399	0,2692	0,2982
6	0,0255	0,051	0,0763	0,1015	0,1266	0,1516	0,1766	0,2014	0,2261	0,2507
7	0,0219	0,0437	0,0655	0,0872	0,1088	0,1304	0,1519	0,1734	0,1947	0,216
8	0,0192	0,0383	0,0574	0,0764	0,0954	0,1144	0,1333	0,1521	0,1709	0,1897
9	0,017	0,0341	0,051	0,068	0,0849	0,1018	0,1187	0,1355	0,1523	0,169
10	0,0153	0,0307	0,046	0,0612	0,0765	0,0917	0,1069	0,1221	0,1373	0,1524

**Таблица В.22 – Расчетное время работы щетки до корректировки натяга инструмента  $\Delta Y$  при  $l_1 = 2$  мм**

Марка щетки	Износ $I$ по (5.59)		Износ $l_{изн}$ , мм				
	$I_{min}$ , мг/мин	$I_{max}$ , мг/мин	0,20	0,35	0,5	0,65	0,8
			Время обработки $T_{изн}$ , мин				
BD-ZB Bristle P50	2,5		14,769	26,769	39,560	53,143	67,516
		26	1,42	2,574	3,804	5,11	6,492
BD-ZB Bristle P80	2,5		14,769	26,769	39,560	53,143	67,516
		14	2,637	4,78	7,064	9,49	12,056
BD-ZB Bristle P120	1,5		24,615	44,615	65,934	88,571	112,527
		7,5	4,929	8,923	13,187	17,714	22,505

**В.7 Результаты теоретического расчета сил  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  (а также упругие и ударные составляющие  $P_{yn}$  и  $P_{y\delta}$ ) и экспериментальные данные при обработке плоскостей**

**Таблица В.23 – Значения сил в зависимости от частоты вращения щетки для В95пчТ2 при  $\Delta Y=1,5$  мм,  $S=130$  мм/мин,  $A=0$  мм**

$n$ , об./ мин	Экспериментальные, Н			Расчетные, Н								
	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$P_x$			$P_y$			$P_z$		
				$P_x$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_y$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_z$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$
500	65,12	151,76	23,53	65,06	65,04	0,02	151,58	151,52	0,06	23,66	23,66	0
1000	80,02	180,01	33,00	80,00	79,95	0,05	180,00	179,86	0,14	33,13	33,13	0
1250	94,98	190,76	37,61	94,93	94,87	0,06	190,94	190,76	0,18	37,64	37,64	0
1600	124,30	202,03	43,91	124,29	124,21	0,08	201,90	201,66	0,24	43,95	43,95	0

**Таблица В.24 – Значения сил в зависимости от деформации щетки для В95пчТ2 при  $n=1000$  об/мин,  $S=130$  мм/мин,  $A=0$  мм**

$\Delta Y$ , мм/ мм	Экспериментальные, Н			Расчетные, Н								
	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$P_x$			$P_y$			$P_z$		
				$P_x$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_y$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_x$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$
0,5	49,52	121,01	25,93	49,64	49,59	0,05	120,32	120,4	0,28	25,93	25,93	0
1	63,52	148,01	30,73	64,93	64,88	0,05	148,36	148,18	0,18	30,73	30,73	0
1,5	80,02	180,01	33,13	80,00	79,95	0,05	180,00	179,86	0,14	33,13	33,13	0
2	99,02	217,01	34,94	99,00	98,95	0,05	217,18	217,07	0,11	34,94	34,94	0

**Таблица В.25 – Значения сил в зависимости от подачи для В95пчТ2 при  $n=1000$  об/мин,  $\Delta Y=1,5$  мм,  $A=0$  мм**

$S$ мм / мм	Экспериментальные, Н			Расчетные, Н								
	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$P_x$			$P_y$			$P_z$		
				$P_x$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_y$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$	$P_x$	$P_{yn}$	$P_{y\delta}$
82	77,56	178,19	26,69	77,55	77,50	0,05	178,91	178,77	0,14	26,82	26,82	0
130	80,02	180,01	33,00	80,00	79,95	0,05	180,00	179,86	0,14	33,13	33,13	0
255	84,93	184,74	46,85	84,89	84,84	0,05	184,36	184,22	0,14	46,88	46,88	0
395	87,83	190,05	57,91	87,82	87,77	0,05	189,81	189,67	0,14	57,70	57,70	0

**Таблица В.26 – Значения сил в зависимости от подачи щетки для В95пчТ2  
при n=1000 об/мин, ΔY=1,5 мм, A=0 мм**

A, мм / mm	Эксперименталь- ные			Расчетные									
	P <sub>x</sub>	P <sub>y</sub>	P <sub>z</sub>	P <sub>x</sub>			P <sub>y</sub>			P <sub>z</sub>			
				P <sub>x</sub>	P <sub>yn</sub>	P <sub>y0</sub>	P <sub>y</sub>	P <sub>yn</sub>	P <sub>y0</sub>	P <sub>x</sub>	P <sub>yn</sub>	P <sub>y0</sub>	
51,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	37,95	64,05	9,13	37,95	37,92	0,03	63,75	63,48	0,27	9,13	9,04	0,09	
30	53,7	94,70	14,14	53,73	53,68	0,05	91,91	91,64	0,27	14,16	14,09	0,07	
22	65,78	122,03	19,19	65,72	65,66	0,06	120,41	120,19	0,22	19,19	19,15	0,04	
0	80,02	180,01	33,00	80,00	79,95	0,05	180,00	179,86	0,14	33,00	33,00	0	
-22	–	–	–	94,93	94,87	0,06	239,75	239,53	0,22	46,89	46,85	0,04	
-30	–	–	–	106,27	106,22	0,05	268,35	268,08	0,27	51,98	51,91	0,07	
-38	–	–	–	121,01	120,98	0,03	296,51	296,24	0,27	57,05	56,97	0,08	
-51,5	–	–	–	159,90	159,90	0	359,72	359,72	0	66,00	66,00	0	

**В.8 Аппроксимирующие выражения, полученные для упрощения  
применения полученной теоретической математической модели  
силового взаимодействия ворсин торцевых полимерно-абразивных  
щеток с обрабатываемой плоскостью в практических целях**

$$P_{x,y,z} = b_1 \cdot \Delta Y^2 + b_2 \cdot n^2 + b_3 \cdot S^2 + b_4 \cdot A^2 + b_5 \cdot \Delta Y + b_6 \cdot n + b_7 \cdot S + b_8 \cdot A + b_9 \cdot \Delta Y \cdot n + b_{10} \cdot \Delta Y \cdot S + b_{11} \cdot \Delta Y \cdot A + b_{12} \cdot n \cdot S + b_{13} \cdot n \cdot A + b_{14} \cdot S \cdot A + b_{15} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot S + b_{16} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot A + b_{17} \cdot \Delta Y \cdot S \cdot A + b_{18} \cdot A \cdot n \cdot S + b_{19} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot S \cdot A + b_{20}; \quad (B.2)$$

Значения коэффициентов  $b_{1-19}$  и свободного члена  $b_{20}$  уравнений (B.2) приведены в таблице В.27.

**Таблица В.27 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (B.2)**

Кoeffи- циент	Значения коэффициентов для сил		
	P <sub>x</sub>	P <sub>y</sub>	P <sub>z</sub>
$b_1$	5	10	-2
$b_2$	$4 \cdot 10^{-5}$	$-1,8 \cdot 10^{-5}$	$-7 \cdot 10^{-7}$
$b_3$	$-7 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-8}$	$-1,2 \cdot 10^{-4}$
$b_4$	-0,02872	-0,026	$-2,99 \cdot 10^{-5}$
$b_5$	20,5	39	11
$b_6$	-0,0302	0,0835	0,02
$b_7$	0,0662	0,0379	0,157
$b_8$	-0,01582	-2,0635	-0,627
$b_9$	$7,8 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-9}$
$b_{10}$	$-1,2 \cdot 10^{-9}$	$2,4 \cdot 10^{-9}$	$2,25 \cdot 10^{-9}$
$b_{11}$	$-4,4 \cdot 10^{-9}$	$-3,5 \cdot 10^{-9}$	$-6 \cdot 10^{-9}$
$b_{12}$	$3,3 \cdot 10^{-10}$	$6,6 \cdot 10^{-10}$	$-1,3 \cdot 10^{-10}$
$b_{13}$	$2,7 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$
$b_{14}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^{-10}$	$8,75 \cdot 10^{-10}$
$b_{15}$	$2,2 \cdot 10^{-11}$	$2,2 \cdot 10^{-11}$	$3,25 \cdot 10^{-11}$
$b_{16}$	$2 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$7 \cdot 10^{-11}$
$b_{17}$	$-7,2 \cdot 10^{-11}$	$-4,8 \cdot 10^{-11}$	$1,34 \cdot 10^{-11}$
$b_{18}$	$-9,8 \cdot 10^{-11}$	$-9,8 \cdot 10^{-11}$	$-6,9 \cdot 10^{-11}$
$b_{19}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$
$b_{20}$	20,8	28,58	-16,68

## В.9 Результаты теоретического расчета температуры в зоне контакта торцевой полимерно-абразивной щетки с обрабатываемой плоскостью и экспериментальные данные

Результаты расчета температуры по предложенной в п. 5.2.3 методике, а также экспериментальные данные приведены в таблице В.28.

**Таблица В.28– Температуры в зоне обработки плоской поверхности торцевой полимерно-абразивной щеткой**

$n$ , об/мин	$\Delta Y$ , мм	$S$ , мм	$A$ , мм	$P_x$ , Н	$P_z$ , Н	$P_y$ , Н	$\Theta_r$ , °C $x=0$	$\Theta_s$ , °C $x=0$	$\Theta_r$ , °C $x=5$ мм	$\Theta_r$ , °C $x=10$ мм
500	1,5	130	0	65,10	23,53	151,75	75,14	75,14	69,62	64,64
1000				80,00	33,00	180,00	117,55	117,55	104,52	93,19
1250				94,95	37,61	190,75	132,36	133,64	114,75	99,86
1600				124,28	43,91	202,02	150,42	150,41	125,50	105,27
1000	0,5	130	0	49,50	26,00	121,00	50,75	50,75	42,60	36,48
	1			63,50	30,00	148,00	74,107	82,51	63,70	55,23
	1,5			80,00	33,00	180,00	117,55	117,55	104,52	93,19
	2			99,00	35,00	217,00	153,40	155,87	137,63	123,71
1000	1,5	82	0	77,558	26,687	178,19	130,54	130,54	117,78	106,47
		130		80,023	33,002	180,00	117,56	117,55	104,52	93,19
		255		84,929	46,852	184,74	83,16	88,21	69,81	59,19
		395		87,827	57,912	190,05	63,02	63,02	49,72	40,36
1000	1,5	130	0	80,00	33,00	180,00	117,55	117,55	104,52	93,19
			22	65,75	19,19	122,02	99,03	–	85,36	73,58
			30	53,68	14,137	94,70	91,51	–	78,01	66,50
			38	37,93	9,13	64,04	70,96	–	58,28	47,87

## В.10 Аппроксимирующие выражения, полученные для упрощения применения полученной теоретической математической модели температуры в зоне обработки при зачистке плоскостей торцевыми полимерно-абразивными щетками

Данные зависимости справедливы для исследованных в настоящей работе полимерно-абразивных щеток при обработке ими плоских поверхностей деталей из сплава В95ПчТ2:

$$\Theta = a_1 \cdot \Delta Y^2 + a_2 \cdot n^2 + a_3 \cdot S^2 + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot n + a_6 \cdot S + a_7 \cdot \Delta Y \cdot n + a_8 \cdot \Delta Y \cdot S + a_9 \cdot n \cdot S + a_{10} \cdot \Delta Y \cdot n \cdot S + a_{11}; \quad (B.3)$$

Значения коэффициентов  $a_{1-10}$  и свободного члена  $a_{11}$  уравнения (B.3) приведены в таблице В.29.

Таблица В.29 – Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (В.3)

Коэффици- циент	Значение коэффициента для торцевых щеток:		
	BD-ZB Scotch- Brite™ Bristle P50	BD-ZB Scotch- Brite™ Bristle P80	BD-ZB Scotch- Brite™ Bristle P50
$a_1$	19,42	0,75	-0,5
$a_2$	$-3 \cdot 10^{-5}$	$-2 \cdot 10^{-6}$	$-5 \cdot 10^{-5}$
$a_3$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$-2,8 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$
$a_4$	18,89	66,375	75,802
$a_5$	0,1231	0,0655	0,1889
$a_6$	-0,4436	-0,05	-0,4493
$a_7$	$1 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$
$a_8$	$-2,5 \cdot 10^{-9}$	$-2,44 \cdot 10^{-9}$	$-5,55 \cdot 10^{-9}$
$a_9$	$4,4 \cdot 10^{-9}$	$5,78 \cdot 10^{-9}$	$9,75 \cdot 10^{-9}$
$a_{10}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-10}$
$a_{11}$	-19	-34,3	-63,3

### В.11 Результаты расчета износа торцевых щеток при зачистке поверхностей на различных режимах обработки

Таблица В.30 – Износ торцевых щеток по (5.91) и интенсивность износа (5.92) в расчете на 1 ворсину при  $S = 130$  мм/мин,  $l_B = 20$  мм

$n$ , об/ мин	$\Delta Y$ , мм	$A$ , мм	$W_z$ , мм	$L_{щ}$ , мм	Щетка BD-ZB P50		Щетка BD-ZB P80		Щетка BD-ZB P120						
					$I_{пл}$ , мг/мин по (5.92)	$I_{в.пл}$ , мг/мин по (5.91)	$I_{пл}$ , мг/мин по (5.92)	$I_{в.пл}$ , мг/мин по (5.91)	$I_{пл}$ , мг/мин по (5.92)	$I_{в.пл}$ , мг/мин по (5.91)					
					500	1,5	0	7,6	2,275	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1,365 \cdot 10^{-4}$	$4,56 \cdot 10^{-4}$	$1,392 \cdot 10^{-4}$	$4,65 \cdot 10^{-4}$
1000	$2,928 \cdot 10^{-4}$	$9,78 \cdot 10^{-4}$	$1,664 \cdot 10^{-4}$	$5,56 \cdot 10^{-4}$	$1,664 \cdot 10^{-4}$					$5,56 \cdot 10^{-4}$					
1250	$3,14 \cdot 10^{-4}$	$1,049 \cdot 10^{-3}$	$1,782 \cdot 10^{-4}$	$5,95 \cdot 10^{-4}$	$1,769 \cdot 10^{-4}$					$5,91 \cdot 10^{-4}$					
1600	$3,357 \cdot 10^{-4}$	$1,121 \cdot 10^{-3}$	$1,902 \cdot 10^{-4}$	$6,35 \cdot 10^{-4}$	$1,875 \cdot 10^{-4}$					$6,26 \cdot 10^{-4}$					
1000	1,5	0	7,6	2,275	$3,145 \cdot 10^{-4}$	$6,14 \cdot 10^{-4}$	$1,801 \cdot 10^{-4}$	$3,52 \cdot 10^{-4}$		$1,876 \cdot 10^{-4}$	$3,66 \cdot 10^{-4}$				
					1	$2,843 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$1,622 \cdot 10^{-4}$		$4,45 \cdot 10^{-4}$	$1,657 \cdot 10^{-4}$	$4,55 \cdot 10^{-4}$			
					1,5	$2,928 \cdot 10^{-4}$	$9,78 \cdot 10^{-4}$	$1,664 \cdot 10^{-4}$		$5,56 \cdot 10^{-4}$	$1,664 \cdot 10^{-4}$	$5,56 \cdot 10^{-4}$			
					2	$3,195 \cdot 10^{-4}$	$1,224 \cdot 10^{-3}$	$1,807 \cdot 10^{-4}$		$6,92 \cdot 10^{-4}$	$1,764 \cdot 10^{-4}$	$6,76 \cdot 10^{-4}$			
1000					1,5	0	7,6	2,275	$2,928 \cdot 10^{-4}$	$9,78 \cdot 10^{-4}$	$1,664 \cdot 10^{-4}$	$5,56 \cdot 10^{-4}$	$1,664 \cdot 10^{-4}$	$5,56 \cdot 10^{-4}$	
								22	1,454	$1,176 \cdot 10^{-4}$	$6,15 \cdot 10^{-4}$	$6,733 \cdot 10^{-5}$	$3,52 \cdot 10^{-4}$	$7,015 \cdot 10^{-5}$	$3,67 \cdot 10^{-4}$
								30	1,023	$6,125 \cdot 10^{-5}$	$4,55 \cdot 10^{-4}$	$3,521 \cdot 10^{-5}$	$2,61 \cdot 10^{-4}$	$3,745 \cdot 10^{-5}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$
								38	0,666	$2,678 \cdot 10^{-5}$	$3,06 \cdot 10^{-4}$	$1,546 \cdot 10^{-5}$	$1,76 \cdot 10^{-4}$	$1,68 \cdot 10^{-5}$	$1,92 \cdot 10^{-4}$



# Приложение Г – Оптимизация процессов зачистки поверхностей и скругления кромок

## полимерно-абразивными инструментами

### Г.1 Программное обеспечение оптимизации процесса зачистки поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами

*Листинг программы, предназначенной для оптимизации процесса зачистки поверхностей эластичными полимерно-абразивными кругами*

*(в качестве примера – круг марки CF-FB 0,5AFIN)*

```
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop
#include "Unit1.h"
#include "Unit2.h"
#include "math.h"
#include "Unit5.h"
//-----
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
TForm5 *Form5;
//-----
__fastcall TForm5::TForm5(TComponent*
Owner)
: TForm(Owner)
{
}
//-----
void __fastcall
TForm5::Button1Click(TObject *Sender)
{
float l, B, Nel, Cel, Ct, Tb, Ra0, Rak, Radost;
float Rk, nk, V, Sp, deltay, r;
float q, Zel, qf, M, T0, temp, Ckr, L, t, C,
Cef;
float a1, a2, a3, a4, a5, a6, a7, a8, a9, a10,
a11;
float Ksh, Bkr;
float deltaL, b4, b5, b6;
float c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7, c8, c9, c10,
c11;
float e1, e2, e3, e4, e5, e6, e7, e8;
float min;
int kol1, kol2;
//float mas[3072], mas1[9216];
float* mas=new float[kol1];
float* mas1=new float[kol2];
int i,j,k;
kol1=0;
kol2=0;
i=0;
j=0;
k=0;
l=StrToFloat(Edit2->Text);
B=(StrToFloat(Edit6->Text));
Nel=StrToFloat(Edit7->Text);
Cel=StrToFloat(Edit8->Text);
Ct=StrToFloat(Edit9->Text)/60;
Tb=StrToFloat(Edit13->Text);
Ra0=StrToFloat(Edit14->Text);
Rak=StrToFloat(Edit15->Text);
//Круг1-CF-FB-0.5AFIN
Rk=96.5;
r=38.25;
Ckr=1970;
Bkr=50;
if (B>Bkr)
{
Ksh=ceil(B/Bkr);
}
else
{
Ksh=1;
}
for(deltay=3; deltay<=4.5; del-
tay=deltay+0.1)
{
for(V=303; V<=3030; V=V+20)
{
for(Sp=50; Sp<=390; Sp=Sp+10)
{
L=fabs(((V-Sp)*1)/Sp);
deltaL=2*sqrt(2*deltay*Rk);
a1=0.001090333333;
a2=0.00000000056571;
a3=0.000000688895;
```

```

a4=0.008166333333;
a5=0.000008920143;
a6=0.000036625571;
a7=0.000002779295;
a8=0.000008831238;
a9=0.000000624486;
a10=0.0000000197262;
a11=-0.0289748095;
q=
L*1000*fabs(a1*deltay*deltay+a2*V*V+a3
*Sp*Sp+a4*deltay+a5*V+a6*Sp+a7*deltay
*V+a8*deltay*Sp+a9*V*Sp+a10*deltay*V
*Sp+a11);
c1=0.034758333333;
c2=0.00000027149667;
c3=0.0000003880833;
c4=0.145301333333;
c5=0.0000731743333;
c6=0.00047328;
c7=0.00002792886667;
c8=-0.000262219333;
c9=-0.00000143631667;
c10=0.00000027635333;
c11=0.19427;
Ra-
dost=fabs(c1*deltay*deltay+c2*V*V+c3*S
p*Sp+c4*deltay+c5*V+c6*Sp+c7*deltay*V
+c8*deltay*Sp+c9*V*Sp+c10*deltay*V*S
p+c11);
e1=5.60395;
e2=0.04105625;
e3=-0.0968395;
e4=-0.001029685;
e5=0.01319605;
e6=-0.0000262375;
e7=0.0000124465;
e8=-3.851095;
temp=fabs(e1*deltay+e2*V+e3*Sp+e4*delt
ay*V+e5*deltay*Sp+e6*V*Sp+e7*deltay*
V*Sp+e8);
//Расчет основного времени обработки
qf=((3*(sqrt(3.14159265359/2))*(Ra0-
Rak))*L);
M=Ksh*(qf/q);
T0=M*((1+deltaL)/Sp);
//Расходы на электроэнергию
Zel=(Cel*Nel*T0)/60;
//Стоимость круга на выполнение опера-
ции

t=fabs(0.000000026883*V*V+0.001089303
33*deltay*deltay-0.00003*V-

```

```

0.0067457333*deltay+0.0000079646333*V
*deltay+0.012035666667);
C=(4*Ckr*t*Ksh*T0*M)/(3.14159265359*(
4*Rk*Rk-(2*Rk-(0.5*(2*Rk-
2*r))*(0.5*(2*Rk-2*r)))));
//Целевая экономическая функция
Cef=T0*(Ct+Zel)+Tb*Ct+C;
if ((Radost>Rak)||((temp>250))
{
}
else
{
//ShowMessage(Cef);
nk=ceil((1000*V)/(3.14159265359*Rk*2));
mas1[i]=Cef;
mas1[j]=deltay;
mas1[j+1]=nk;
mas1[j+2]=Sp;
kol1=kol1+1;
kol2=kol2+3;
i=i+1;
j=j+3;
} } }
if (i==0)
{
ShowMessage("Нет таких режимов");
//Edit1->Text=" ";
//Edit3->Text=" ";
}
else
{
i=0;
min=mas[0];
for (i=0; i<kol1; i++)
{
//ShowMessage(mas[i]);
if (mas[i]<min)
{ min=mas[i];
k=i;
}
}
Edit1->Text=FloatToStr(min);
Edit3->Text=FloatToStr(mas1[k])+
"+FloatToStr(mas1[k+1])+ "
"+FloatToStr(mas1[k+2]);
} }
//-----

```

## Г.2 Параметры и их идентификаторы в программе оптимизации зачистки плоскостей эластичными полимерно-абразивными кругами

В программе оптимизации зачистки плоскостей эластичными полимерно-абразивными кругами (см. п. 7.3 и п. Г.1 приложения Г) использованы следующие параметры и их идентификаторы (таблица Г.1):

**Таблица Г.1 – Параметры и их идентификаторы в программе, описанной в п. 7.3 и п. Г.1**

Наименование параметров	Обозначение в теории	Идентификатор в программе	Тип данных	Единицы измерения	Примечания
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Ширина обрабатываемого образца	$b$	B	Вещ.	мм	Входной параметр
Длина обрабатываемого образца	$l$	l	Вещ.	мм	Входной параметр
Фактическая мощность привода	$N_{ЭЛ}$	Nel	Вещ.	кВт	Входной параметр
Стоимость одного кВт/ч электроэнергии	$C_{ЭЛ}$	Cel	Вещ.	руб.	Входной параметр
Вспомогательное время операции	$T_e$	Tb	Вещ.	мин.	Входной параметр
Тарифная ставка рабочего	$C_T$	Ct	Вещ.	руб/час	Входной параметр
Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности	$Ra^0$	Ra0	Вещ.	мкм	Входной параметр
Требуемая по чертежу шероховатость	$Ra^k$	Rak	Вещ.	мкм	Входной параметр
Ширина круга	$B_k$	Bkr	Вещ.	мм	
Радиус круга	$R_k$	Rk	Вещ.	мм	
Радиус отверстия круга	$r_k$	r	Вещ.	мм	
Стоимость эластичного абразивного круга	$C_{кр}$	Ckr	Вещ.	руб.	
Стоимость эластичного абразивного круга на выполнение операции	$C$	C	Вещ.	руб.	
Основное время обработки	$T_{зач}$	T0	Вещ.	Мин.	
Затраты на электроэнергию	$Z_{ЭЛ}$	Zel	Вещ.	руб.	
Достижимая шероховатость по параметру Ra	$Ra$	Radost	Вещ.	мкм	
Частота вращения круга	$n$	nk	Вещ.	об/мин	
Коэффициент, учитывающий ширину обрабатываемой поверхности	$K_{ш}$	Ksh	Вещ.	–	
Количество проходов	$M$	N	Вещ.	–	
Путь перемещения поверхности инструмента относительно детали	$L$	L	Вещ.	м	

## Окончание таблицы Г.1

1	2	3	4	5	6
Дополнительное перемещение на вход и выход инструмента при обработке	$\Delta l$	deltaL	Вещ.	мм	
Объем материала, который необходимо удалить с микро-неровностей на единице площади	$Q_f$	qf	Вещ.	мкм	
Удельный съем с площади а 1 мм <sup>2</sup>	$q$	q	Вещ.	мкм/м·мин	
Износ инструмента	$I$	t	Вещ.	мм/мин	
Температура в зоне резания	$\Theta$	temp	Вещ.	°С	
Вспомогательный параметр	–	i	Цел.	–	
Вспомогательный параметр	–	j	Цел.	–	
Вспомогательный параметр	–	k	Цел.	–	
Вспомогательный параметр	–	kol1	Цел.	–	
Вспомогательный параметр	–	kol2	Цел.	–	
Скорость резания	$V$	V	Вещ.	м/мин	Выходной параметр
Продольная подача	$S$	Sp	Вещ.	мм/мин	Выходной параметр
Деформация круга	$\Delta Y$	deltay	Вещ.	мм	Выходной параметр
Целевая экономическая функция (себестоимость выполнения операции)	$ЦЭФ$	Cef	Вещ.	руб.	Выходной параметр

### Г.3 Программное обеспечение оптимизации процесса скругления кромок эластичными полимерно-абразивными инструментами

*Листинг программы, предназначенной для оптимизации процесса скругления кромок эластичными полимерно-абразивными инструментами  
(в качестве примера – щетка ВВ-ZB-Туре С Р120)*

```
//-----
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop
#include "Unit1.h"
#include "Unit2.h"
#include "math.h"
#include "Unit5.h"
//-----
#pragma package(smart_init)

#pragma resource "*.dfm"
TForm5 *Form5;
//-----
__fastcall TForm5::TForm5(TComponent*
Owner)
: TForm(Owner)
{
}
//-----
```

```

void __fastcall TForm5::Button1Click(TObject
*Sender)
{
float l, B, Nel, Cel, Ct, Tb, alfa, Rak, Radost;
float Rk, nk, V, Sp, deltax, r;
float q, Zel, Nel1, M, T0, Prez, Ckr, L, t, C,
Cef;
float a1, a2, a3, a4, a5, a6, a7, a8, a9, a10, a11;
float Rmax, Rmin;
float deltaL, b4, b5, b6;
float c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7, c8, c9, c10, c11;
float e1, e2, e3, e4, e5, e6, e7, e8;
float min;
int kol1, kol2;
//float mas[3072], mas1[9216];
float* mas=new float[kol1];
float* mas1=new float[kol2];
int i,j,k;
kol1=0;
kol2=0;
i=0;
j=0;
k=0;
l=StrToFloat(Edit2->Text);
Rmin=(StrToFloat(Edit6->Text));
Nel=StrToFloat(Edit7->Text);
Cel=StrToFloat(Edit8->Text);
Ct=StrToFloat(Edit9->Text)/60;
Tb=StrToFloat(Edit13->Text);
Rmax=StrToFloat(Edit14->Text);
Rak=StrToFloat(Edit15->Text);
//Щетка ВВ-ZB-Type C P120
for(deltax=1.5; deltax<=5; deltax=deltax+0.1)
{
for(V=200; V<=1500; V=V+5)
{
for(Sp=50; Sp<=1000; Sp=Sp+5)
{
a1=0.004857;
a2=0.0000007929;
a3=-0.000009;
a4=0.00003514;
a5=-0.0000001016;
a6=0.0000002857;
a7=0.0000004754;
a8=0.000000386;
a9=0.00000004857;
a10=0.00000002743;
a11=0.32;
q=
fabs(a1*deltax*deltax+a2*V*V+a3*Sp*Sp+a4

```

```

*deltax+a5*V+a6*Sp+a7*deltax*V+a8*deltax
*Sp+a9*V*Sp+a10*deltax*V*Sp+a11);
c1=-0.02;
c2=-0.0000005703;
c3=0.179;
c4=0.001596;
c5=0.00007938;
c6=0.2224;
Ra-
dost=fabs(c1*deltax*deltax+c2*V*V+c3*deltax
+c4*V+c5*deltax*V+c6);
e1=-0.00000008;
e2=-0.235;
e3=0.0238;
e4=3.987;
e5=0.00001;
e6=-12.44;
Prez=fabs(e1*V*V+e2*deltax*deltax+e3*V+e
4*deltax+e5*deltax*V+e6);
//Расчет основного времени обработки
T0=l/Sp;
//ShowMessage(T0);
//Расходы на электроэнергию
B=13;
Nel1=(B*Prez*V)/61200;
//ShowMessage(Nel1);
Zel=(Cel*Nel1*T0)/60;
//Стоимость круга на выполнение операции
Rk=150;
Ckr=(225.38/2901.15); //руб за 1 рабочий
миллиграмм инструмента
t=fabs(0.0000072*V*V-
0.99*deltax*deltax+0.005*V+7.8674*deltax+0
.0008*V*deltax-16.24);
C=Ckr*t;
//Целевая экономическая функция
Cef=T0*(Ct+Zel)+Tb*Ct+C;
if ((Ra-
dost>Rak)||(q>Rmax)||(q<Rmin)||(Nel1>Nel))
{
}
else
{
//ShowMessage(Cef);
nk=ceil((1000*V)/(3.14159265359*Rk*2));
mas[i]=Cef;
mas1[j]=deltax;
mas1[j+1]=nk;
mas1[j+2]=Sp;
kol1=kol1+1;
kol2=kol2+3;
i=i+1;

```

```

j=j+3;
}
}
}
}
if (i==0)
{
ShowMessage("Невозможно достичь требу-
емой шероховатости (радиуса) или недоста-
точно мощности электродвигателя");
//Edit1->Text=" ";
//Edit3->Text=" ";
}
else
{
i=0;
min=mas[0];
for (i=0; i<kol1; i++)
{
if (mas[i]<min)
{min=mas[i];
k=i;
}
}
}
alfa=
ceil(573248*(((sqrt((0.019533+0.000916*1.5)*
(0.019533+0.000916*1.5)-
4*0.001067*(0.00235*1.5*1.5+0.011263*1.5-
0.51))))-0.019533-0.000916*1.5)/2*0.001067));
Edit1->Text=FloatToStr(min)+" руб. ";
Edit3->Text=FloatToStr(mas1[k])+
"+FloatToStr(mas1[k+1])+ "
"+FloatToStr(mas1[k+2])+ " a, °=
"+FloatToStr(alfa);
}
}
//-----

```

#### Г.4 Параметры и их идентификаторы в программе оптимизации скругления кромок эластичными полимерно- абразивными инструментами

В программе оптимизации скругления кромок эластичными абразивными инструментами (см. п. 7.6 и п. Г.3 приложения Г) использованы следующие параметры и их идентификаторы (таблица Г.2):

**Таблица Г.2 – Параметры и их идентификаторы в программе,  
описанной в п. 7.6 и п. Г.3**

Наименование параметров	Обозначение в теории	Идентификатор в программе	Тип данных	Единицы измерения	Примечания
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Длина обрабатываемой кромки	$l_r$	l	Вещ.	мм	Входной параметр
Фактическая мощность привода электродвигателя	$N_{ЭЛ(\phi)}$	Nel	Вещ.	кВт	Входной параметр
Стоимость одного кВт/ч электроэнергии	$C_{ЭЛ}$	Cel	Вещ.	руб.	Входной параметр
Вспомогательное время операции	$T_e$	Tb	Вещ.	мин.	Входной параметр
Тарифная ставка рабочего	$C_T$	Ct	Вещ.	руб/час	Входной параметр

## Окончание таблицы Г.2

Минимальный требуемый размер кромки	$R_{min}$	Rmin	Вещ.	мм	Входной параметр
Максимальный требуемый размер кромки	$R_{max}$	Rmax	Вещ.	мм	Входной параметр
Требуемая по чертежу шероховатость	$Ra^k$	Rak	Вещ.	мкм	Входной параметр
Ширина щетки	$B_k$	B	Вещ.	мм	
Радиус щетки	$R_k$	Rk	Вещ.	мм	
Стоимость 1 мг эластичной абразивной щетки	$C_{кр}$	Ckr	Вещ.	руб/мг	
Стоимость эластичной абразивной щетки на выполнение операции	$C$	C	Вещ.	руб.	
Основное время обработки	$T_r$	T0	Вещ.	Мин.	
Затраты на электроэнергию	$Z_{эл}$	Zel	Вещ.	руб.	
Требуемая мощность привода электродвигателя	$N_{эл}$	Ne11	Вещ.	кВт	
Тангенциальная составляющая силы резания	$P_z$	Prez	Вещ.	Н	
Достижимая шероховатость по параметру Ra	$Ra$	Radost	Вещ.	мкм	
Частота вращения щетки	$n$	nk	Вещ.	об/мин	
Размер скругленной кромки, полученный при обработке	$Z_k$	q	Вещ.	мм	
Износ инструмента	$I$	t	Вещ.	мм/мин	
Вспомогательный параметр	–	i	Цел.	–	
Вспомогательный параметр	–	j	Цел.	–	
Вспомогательный параметр	–	kol1	Цел.	–	
Вспомогательный параметр	–	kol2	Цел.	–	
Вспомогательный параметр	–	min	Вещ.		
Скорость резания	$V$	V	Вещ.	м/мин	Выходной параметр
Подача вдоль кромки	$S$	Sp	Вещ.	мм/мин	Выходной параметр
Деформация щетки	$\Delta Y$	deltay	Вещ.	мм	Выходной параметр
Угол, характеризующий положение щетки относительно обрабатываемой кромки	$\alpha$	alfa	Вещ.	°	Выходной параметр
Целевая экономическая функция (себестоимость выполнения операции)	$ЦЭФ$	Cef	Вещ.	руб.	Выходной параметр

## Приложение Д (справочное) – Информация об использованных инструментах и оборудовании

### Д.1 – Характеристики абразивного материала Кубитрон (Cubitron™)

*Минерал Кубитрон (Cubitron™)* разработан компанией 3М («Minnesota Mining and Manufacturing Company») [270]. Производится двух марок Кубитрон 321 и Кубитрон 324. Химический состав Кубитрон 321 и Кубитрон 324 приведен в таблице Д.1.

Таблица Д.1 – Химический состав Кубитрон 321 и Кубитрон 324 [270]

Элемент	Содержание, %	
	Кубитрон 321	Кубитрон 324
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	94–96	92,3–95,6
MgO	0,9–1,5	0,75–1,25
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,9–1,5	0,75–1,5
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,9–2,9	3,0–5,0
TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , CaO, CoO, Fe	Незначительное содержание	

Согласно информации производителя [270], Кубитрон 321 с микрочернами Cubitron™ используется в инструментах с керамической связкой и представляет собой твердый, самозатачивающийся, термостойкий абразив, способный работать при больших усилиях. В отличие от обычных абразивных минералов (таких как Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC), кубитрон изнашивается за счет откалывания от зерен мельчайших частиц. Благодаря этому он сохраняет особо острые режущие зерна в процессе эксплуатации, вследствие чего обеспечивается стабильно высокая производительность процесса обработки. Кубитрон 324 крошится и самозатачивается с меньшими усилиями по сравнению с материалом Кубитрон 321. Поэтому в основном он используется при производстве инструментов со связкой из смолы [270].

### Д.2 – Характеристики робототехнического комплекса на базе промышленного робота Kuka KR210 R 2700 Extra, оснащенного электрошпинделем Elettromeccanica Giordano Colombo RC90

Согласно информации производителя [139], робот предназначен для выполнения следующих функций: механическая обработка металлов и пластмасс; манипулирование, погрузка, разгрузка и другие операции манипулирования; металлолитейное, формовочное, прессовое производства; сборка, вставка, установка, скрепление и другие операции.

Система программного обеспечения: Windows XP. Работа возможна по заданным вручную траекториям либо по траекториям, составленным по 3D модели.

Технические характеристики робота KUKA KR 210 R2700 EXTRA, приведенные в его паспорте и на официальном сайте производителя [139], представлены в таблице Д.2.



**Таблица Д.2 – Технические характеристики робота KUKA KR 210 R2700 EXTRA**

<b>Характеристика</b>	<b>Значение</b>
Система управления:	KR C4
Тип защиты:	IP 65
Количество осей:	6
Грузоподъемность (кг):	210
Радиус действия (мм):	2696
Повторяемость (мм):	0.06
Монтажное положение:	на полу
Вес (кг):	1068
Диапазон перемещения (град):	ось 1 +185/-185 , ось 2 +5/-140 , ось 3 +155/-120 , ось 4 +350/-350 , ось 5 +125/-125 , ось 6 +350/-350
Максимальная скорость перемещения (град/сек):	ось 1 - 123, ось 2 - 115, ось 3 - 120, ось 4 - 179, ось 5 - 172, ось 6 - 219

<b>Электрошпиндель модели RC90</b>	
Частота вращения, об/мин	240-24000
Номинальная частота, Гц	400
Номинальное напряжение, В	380
Номинальная мощность, кВт	4
Номинальный ток, А	9,4
Номинальный крутящий момент, нм	1,59
Количество полюсов	2
Охлаждение	водопроводный воздух
Цанги	Ø2-16 мм. (2,3,4,5.....16 мм).
Смена инструментов	3 инструмента в магазине. Магазинов несколько

### **Д.3 – Технические характеристики модульной балансировочной машины**

#### **Haimer TD2009 Comfort Plus**

**Таблица Д.3 – Технические характеристики модульной балансировочной машины Haimer**

#### **TD2009 Comfort Plus**

<b>Характеристика</b>	<b>Значение</b>
Вес, кг	450
Габариты, мм	1100 x 1500 x 820
Рабочие обороты шпинделя, 1/мин	300 - 1100
точность измерения, гмм	< 0,5
Параметры сети, В/Гц	230 / 50 - 60
Мощность, кВт	0,4
Сжатый воздух, бар	6
Макс. длина инструмента, мм	400
Макс. длина инструмента (по желанию), мм	700
Макс. диаметр инструмента, мм	380
Макс. диаметр инструмента (по желанию), мм	425
Макс. вес инструмента, кг	30

#### Д.4 – Технические характеристики аналитических весов Ohaus DV 214 C

Таблица Д.4 – Технические характеристики аналитических весов Ohaus DV 214C [325]

Характеристика	Значение
<b>Основные характеристики</b>	
Верхняя граница диапазона измерений, г	210
Цена деления, мг	0,1
Класс точности	I
Количество диапазонов взвешивания	1
Дополнительные единицы измерения веса	г, мг, карат, унция, гран, тройская унция, пеннивейт, мом, тайл, тола
Калибровка	авто
Платформа, мм	Ø 90
Материал платформы	нержавеющая сталь
Взрывозащита	Нет
<b>Параметры дисплея</b>	
Тип дисплея	ЖК с подсветкой
<b>Программное обеспечение и каналы связи</b>	
Интерфейс	RS-232
Радиоканал	Нет
Blue Tooth	Нет
<b>Электропитание</b>	
Сеть переменного тока 50 Hz	220
Адаптер	Да
Индикация заряда батареи	Нет
<b>Условия эксплуатации</b>	
Нижняя граница диапазона рабочих температур, °С	+10
Верхняя граница диапазона рабочих температур, °С	+40
<b>Габариты и масса</b>	
Габариты(ДхШхВ), мм	200×300×457
Масса изделия, кг	10,2

#### Д.5 – Технические характеристики большого инструментального микроскопа с цифровым отсчетным устройством БМИ 1Ц

Таблица Д.5 – Технические характеристики большого инструментального микроскопа с цифровым отсчетным устройством БМИ 1Ц [202]

Характеристика	Значение
Пределы измерения, мм: в продольном направлении в поперечном направлении	0÷150 0÷50
Пределы измерения микрометрическими винтами, мм	0÷25
Увеличение основного микроскопа	10 <sup>x</sup> ; 15 <sup>x</sup> ; 30 <sup>x</sup> ; 50 <sup>x</sup>

Увеличение объективов	1 <sup>x</sup> ; 1,5 <sup>x</sup> ; 3 <sup>x</sup> ; 5 <sup>x</sup>
Увеличение окуляра	10 <sup>x</sup>
Поле зрения основного микроскопа (диаметр рассматриваемого круга) в зависимости от увеличения, мм	21; 14; 7; 4,2
Увеличение отсчетного микроскопа окулярной угломерной головки	45 <sup>x</sup>
Наибольшее расстояние между центрами, мм	235 при изделии Ø до 85 мм и 315 при изделии Ø до 39 мм
Наибольший диаметр устанавливаемого в центрах изделия, мм	85
Наибольший диаметр изделия, устанавливаемого в призматических опорах, мм	130
Наибольшее расстояние между объективом и измерительным столом, мм	200
Расстояние от колонки до оси тубуса микроскопа (вылет), мм, не менее	165
Цена деления: шкалы микрометрических винтов, мм угломерной головки, минут	0,005 1
Пределы поворота стола, град.	0÷360
Величина отсчета по нониусу шкалы поворота стола, минут	3
Пределы наклона колонки микроскопа от вертикального положения, град.	±12,5
Цена деления шкалы наклона микроскопа, град.	0,5
Масса прибора с угломерной головкой и осветителем, кг, не более	75
Масса комплекта прибора в упаковке, кг, не более	180
Наибольшие габаритные размеры прибора, мм: длина x ширина x высота	840 x 800 x 870

## Д.6 – Технические характеристики профилометра

### Taylor Hobson Form Talysurf i200

Таблица Д.6 – Технические характеристики профилометра

### Taylor Hobson Form Talysurf i200 [339]

Наименование параметра	Значение
Параметры шероховатости, которые измеряются	<i>Ra, Rz, Rmax, Rt, Rq, Rp<sub>c</sub>, Rsm, Rmr, Rp, Rpm, Rz<sub>z</sub>, Rz<sub>m</sub></i> согласно ДСТУ 2413, ISO 4287; MOTIF-параметры <i>R, Rx, AR, Pbc</i> согласно DIN EN ISO 12085, <i>Rz-JIS, Rmax-JIS</i> согласно JIS-B 0601
Формы детали	Прямоугольные, выпуклые, вогнутые, отверстия (диаметр цилиндрической части от 4,0 мм)
Диапазон измерения	От 0 до 1000 мкм
Направление измерения	Продольное, поперечное

Рабочая зона	360°
Метрологические характеристики	Рабочий эталон 1 разряда согласно ДСТУ 5017 и 1 класса точности согласно DIN
Дискретность измерения: в диапазоне до 160 мкм в диапазоне до 1000 мкм	0,01 мкм 0,04 мкм
Фильтры по ISO 11562, часть 1	Фильтр Гаусса (M1); цифровой фильтр на 0,025; 0,08; 0,8; 2,8; 8 мм. Удвоенный фильтр Гаусса (M2)
Базовые линии измерения по ISO 4288	0,48; 1,5; 4,8; 15; 20 мм
Базовые линии измерения по ISO 4287	0,4; 1,25; 4,0; 12,5 мм

### Д.7 – Технические характеристики оптического профилометра Bruker Contour GT-K1

Таблица Д.7 – Технические характеристики прибора Bruker Contour GT-K1

Характеристика	Значение
Максимальный диапазон сканирования	До 10 мм
Вертикальное разрешение	< 0,01 нМ
RMS воспроизводимость (PSI)	0,01 нМ
Шаговая высотная точность	< 0,75 %
Шаговая высотная воспроизводимость	< 0,1 %
Максимальная скорость сканирования	73 мкм/сек
Максимально допустимый наклон	До 40° (яркие поверхности); До 87° (грубые поверхности)
Оптический измерительный модуль	Запатентованное ведомое двойным образом освещение; одно-объективный адаптер или автоматизированная турель
Объективы	5x, 10x
Доступное увеличение масштаба изображения	0.55x, 1x, 2x
Камера	Стандартная монохромная 640x480
Программное обеспечение	Vision64 для 64-битной ОС Windows7
Вес прибора	60 кг

## Д.8 – Измерительная система на базе динамометра Kistler 9253B23

Схема подключения динамометра приведена на рисунке Д.1.



Рисунок Д.1 - Схема подключения динамометра [244]

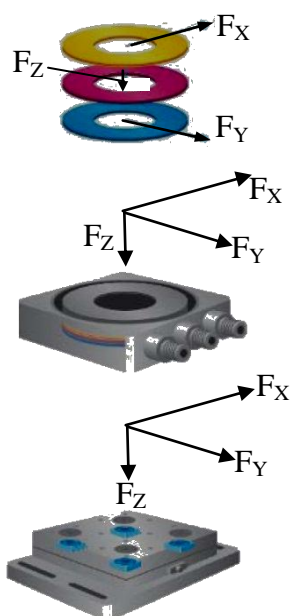


Рисунок Д.2 - Структура трехкомпонентного датчика силы и динамометра [244]

При измерении сил резания, вектор силы резания, действующей на инструмент, динамометр раскладывает на три ортогональные составляющие:  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ .

В данном динамометре реализован пьезоэлектрический принцип действия. Структура многокомпонентного датчика (рисунок Д.2) аналогична структуре однокомпонентного датчика [244]. Используется пара кварцевых колец для определения силы  $F_z$  в направлении оси  $Z$  и две дополнительные пары для определения сил  $F_x$  и  $F_y$ .

Результирующая сила, которая действует на динамометр, пропорциональна алгебраической сумме соответствующих компонентов отдельных сил, образующихся в результате параллельного расположения [244]. Таким образом, динамометр является многокомпонентным датчиком силы, независимым от точки ее приложения [244].

Согласно [244], основными областями применения динамометра являются: динамические и квазистатические измерения; исследования силы резания при точении, фрезеровании, шлифовании и т. п., аэродинамические испытания моделей.

Технические данные динамометра, отмеченные в его паспорте, представлены в таблице Д.8.

Технические характеристики 8-канального усилителя-преобразователя типа 5070A01110 фирмы Kistler (Швейцария) приведены в таблице Д.9.

Таблица Д.8 – Технические характеристики динамометра модели 9253В23

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Значение
Диапазон измерения	$F_x, F_y, F_z$	кН	$\pm 30,0$
Чувствительность	$F_x, F_y$	пКл/Н	$\approx 7,5$
	$F_z$	пКл/Н	$\approx -3,7$
Собственная частота	$f_{nx}, f_{ny}$	кГц	$\approx 2,3$
	$f_{nz}$	кГц	$\approx 3,5$
Диапазон рабочих температур	–	°С	от 0 до 70
Длина, ширина, высота	–	мм	170x100x60
Масса	–	кг	7,3

Таблица Д.9 – Технические характеристики усилителя-преобразователя типа 5070А01110

Наименование показателя	Единица измерения	Значение
Диапазон измерения	пКл	от 200 до 200000; от -200000 до -200
Диапазон частот	кГц	от 0 до 45
Выходной сигнал	В	от -10 до 10
Питание	В	от 100 до 240
Интерфейс	–	RS-232C

Для сбора и анализа данных используется программное обеспечение DynoWare 2.4.1.6 Kistler (Швейцария), установленное на ноутбуке (см. рисунок 2.25) и совместимое с динамометрами или одно- и многокомпонентными датчиками силы. Данное программное обеспечение обеспечивает непрерывную визуализацию измеряемых кривых, а также оснащено всеми необходимыми математическими и графическими функциями.

При настройке программы вводятся значения чувствительности из заводского протокола калибровки. Также при настройке вводятся размерные параметры динамометра. Результаты измерения выдаются через каждые 0,3 секунды рядом значений силы.

Более подробное описание методики проведения измерения сил на подобном динамометре фирмы Kistler (Швейцария) рассмотрено в работе [244].

## Д.7 – Технические характеристики тепловизора FLIR Orion SC7000M

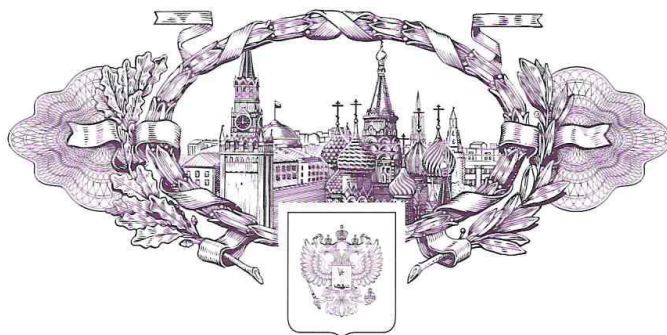
Таблица Д.10 – Технические характеристики тепловизора FLIR Orion SC7000M [226, 227]

Характеристика	Значение
<b>Детектор</b>	
Тип детектора	InSb, МСТ (HgCdTe)
Спектральный диапазон	1,5 – 5,1 ; 7,7 – 11,5 мкм
Разрешение изображения	320x256, 640x512 пикселей / 14 бит
Размер ячейки матрицы детектора	15 – 30 мкм
Способ охлаждения детектора	Встроенное по циклу Стирлинга
Температурная чувствительность	от 18 мК при +30°C
Частота смены кадров	100-400 Гц в полнокадровом режиме; до 20000 Гц в уменьшенном окне
Время интегрирования	от 3 мкс (настраиваемое с шагом 1 мкс)
<b>Оптика</b>	
Объективы	сменные, резьба M80, 42° (12 мм), 21° (25 мм), 11° (50 мм), 5° (100 мм), 2.7° (200 мм), X1 (ближний фокус, 9,6 x 7,7 мм)
Спектральные фильтры	с различными диапазонами и коэффициентами пропускания
Смена фильтров	автоматическая моторизованная, с возможностью мультиспектральной съемки в режиме ORION – непрерывное вращение кассеты с фильтрами
Фокусировка	ручная
<b>Измерение</b>	
Интервал температур	от -20°C до +3000°C в нескольких диапазонах
Калибровка	Постоянная, с настраиваемым температурным диапазоном и временем интегрирования благодаря функции HyperCal (для InSb), возможность самостоятельной калибровки камеры
Погрешность	±1°C или ± 1% от абсолютной температуры (в °C)
<b>Передача данных</b>	
Тип	Gigabit Ethernet, CamLink
Стандарт	IEEE 802.3
Тип разъема	RJ-45
Данные	Передача потока радиометрических изображений разрядностью 14 бит
<b>Система питания</b>	
Параметры	12 В постоянного тока, 30 Вт
Питание	Сетевой адаптер переменного тока, возможно аккумуляторное питание
Требования к условиям окружающей среды	Интервал рабочих температур От -20°C до +55°C
Ударная нагрузка	25 g, IEC 68068-2-29
Вибрация	2g, IEC 60068-2-6
<b>Физические характеристики</b>	
Масса	7 кг
Габариты	268 мм × 180 мм × 168 мм
Монтаж на штатив	UNC 0,25 дюйма
Корпус	Алюминий



# Приложение Е – Результаты интеллектуальной деятельности

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 187637

## УСТАНОВКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ КРОМОК НА ДЛИННОМЕРНЫХ ДЕТАЛЯХ ТИПА ПРОФИЛЕЙ

Патентообладатели: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский национальный исследовательский технический университет" (ФГБОУ ВО "ИРНИТУ") (RU), Публичное акционерное общество "Научно-производственная корпорация "Иркут" (RU)*

Авторы: *Димов Юрий Владимирович (RU), Подашев Дмитрий Борисович (RU), Китов Александр Константинович (RU), Чапышев Александр Петрович (RU)*

Заявка № 2018113559

Приоритет полезной модели 13 апреля 2018 г.


Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 14 марта 2019 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 13 апреля 2028 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11)

**187 637**<sup>(13)</sup> **U1**

(51) МПК  
B24B 9/02 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

**(12) ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

(52) СПК  
B24B 9/02 (2018.08)

(21)(22) Заявка: 2018113559, 13.04.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
13.04.2018

Дата регистрации:  
14.03.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 13.04.2018

(45) Опубликовано: 14.03.2019 Бюл. № 8

Адрес для переписки:

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет

(72) Автор(ы):

Димов Юрий Владимирович (RU),  
Подашев Дмитрий Борисович (RU),  
Китов Александр Константинович (RU),  
Чапышев Александр Петрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Иркутский национальный  
исследовательский технический университет"  
(ФГБОУ ВО "ИРНИТУ") (RU),  
Публичное акционерное общество  
"Научно-производственная корпорация  
"Иркут" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2619651 C2, 17.05.2017. SU  
1491670 A1, 07.07.1989. RU 79066 U1,  
20.12.2008. US 5216844 A, 08.06.1993.

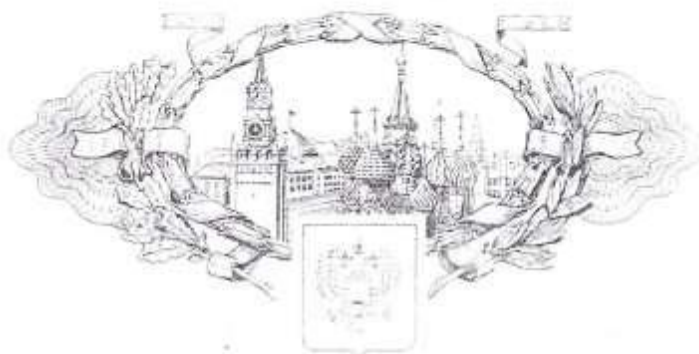
R U  
1 8 7 6 3 7  
U 1

**(54) УСТАНОВКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ КРОМОК НА ДЛИННОМЕРНЫХ ДЕТАЛЯХ ТИПА  
ПРОФИЛЕЙ**

**(57) Формула полезной модели**

1. Установка для обработки кромок на длинномерных деталях типа профилей, содержащая портал, установленную на нем траверсу, размещенный на траверсе привод с инструментом и узлом его крепления и рольганг с вращающимися роликами, на которых установлен с возможностью возвратно-поступательного перемещения рабочий стол с размещенными на нем съемными упорами для базирования обрабатываемого профиля относительно упомянутого инструмента, отличающаяся тем, что она снабжена размещенным на траверсе вторым приводом с инструментом и узлом его крепления, при этом приводы упомянутых инструментов установлены с возможностью вертикального и горизонтального перемещений по траверсе, а инструменты выполнены в виде полимерно-абразивных щеток, установленных с обеих сторон обрабатываемого профиля с расположением их осей до вертикальной плоскости профиля на расстоянии, обеспечивающем симметричность скругленной кромки относительно вертикальной и горизонтальной плоскостей обрабатываемого профиля.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 91509

**ЩЕТКА ПОЛИМЕРНО-АБРАЗИВНАЯ ДЛЯ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ**

Патентообладатель(и): *Государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
"Иркутский государственный технический университет"  
(ГОУ ИрГТУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

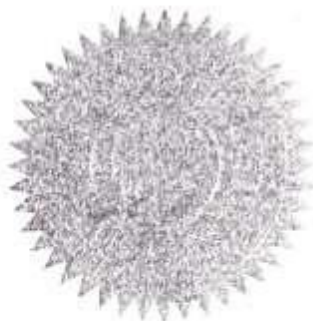
Заявка № 2009136118

Приоритет полезной модели 29 сентября 2009 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 20 февраля 2010 г.

Срок действия патента истекает 29 сентября 2019 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной  
собственности, патентам и товарным знакам



Б.Л. Симонов



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2561342

### СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩЕГО МИКРОРЕЛЬЕФА ЭЛАСТИЧНОГО АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский национальный исследовательский технический университет" (ФГБОУ ВО "ИРНИТУ") (RU), Открытое акционерное общество "Научно-производственная корпорация "Иркут" (ОАО "Корпорация "Иркут") (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014120051

Приоритет изобретения 19 мая 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 30 июля 2015 г.

Срок действия патента истекает 19 мая 2034 г.

Заместитель руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий







ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014120051/28, 19.05.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
19.05.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 19.05.2014

(45) Опубликовано: 27.08.2015 Бюл. № 24

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2187070 C1, 10.08.2002. SU 1315868  
A1, 07.06.1987. US 7451637 B2, 18.11.2008. SU  
1111024 A1, 30.08.1984

Адрес для переписки:

664074, г.Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет

(72) Автор(ы):

Димов Юрий Владимирович (RU),  
Подашев Дмитрий Борисович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Иркутский национальный  
исследовательский технический университет"  
(ФГБОУ ВО "ИРНИТУ") (RU),  
Открытое акционерное общество "Научно-  
производственная корпорация "Иркут" (ОАО  
"Корпорация "Иркут") (RU)(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩЕГО МИКРОРЕЛЬЕФА ЭЛАСТИЧНОГО  
АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

(57) Реферат:

Изобретение относится к технической диагностике и может быть использовано для контроля микрорельефа эластичных материалов в машиностроении и приборостроении. Технический результат заявляемого изобретения заключается в повышении качества слепков по заполняемости неровностей и, как следствие, повышении точности значений параметров режущего микрорельефа эластичного абразивного инструмента, соответствующих его деформированному состоянию в процессе обработки. Способ включает формирование слепка путем прижатия пластичного материала к контролируемой поверхности с последующим

отделением сформированного слепка от контролируемой поверхности и определением параметров режущего микрорельефа по неровностям контактной поверхности слепка, согласно изобретению одновременно с формированием слепка осуществляют деформирование эластичного абразивного инструмента путем прижатия разогретого пластичного материала к поверхности эластичного абразивного инструмента через жесткую, имитирующую форму обрабатываемой поверхности металлическую пластину с силой, необходимой для деформации эластичного абразивного инструмента на 0,5-5 мм. 3 ил.

RU 2 561 342 C1

RU 2 561 342 C1



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014613558

### Оптимизация финишной обработки деталей эластичным абразивным инструментом

Правообладатели: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Иркутский государственный технический университет" (ФГБОУ ВПО "ИрГТУ") (RU), Открытое акционерное общество "Научно-производственная корпорация "Иркут" (ОАО "Корпорация "Иркут") (RU)*

Автор: *Подашев Дмитрий Борисович (RU)*

Заявка № 2014610836

Дата поступления 07 февраля 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 марта 2014 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



# СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018617430

**Оптимизация скругления острых кромок деталей  
эластичными полимерно-абразивными щетками**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Иркутский  
национальный исследовательский технический университет»  
(ФГБОУ ВО «ИРНИТУ») (RU)*

Автор: *Подашев Дмитрий Борисович (RU)*



Заявка № 2018614648

Дата поступления 10 мая 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 25 июня 2018 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Ивлиев*

**Приложение Ж – Акты внедрения основных результатов  
диссертационной работы и обоснования  
экономической эффективности полученных результатов**







В рамках вышеперечисленных договоров выполнены следующие НИОКТР:

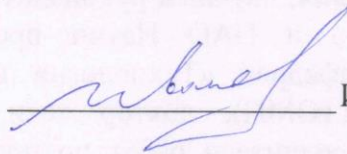
1. Разработка комплексной технологии финишной обработки деталей эластичными полимерно-абразивными инструментами, предназначенной для использования при изготовлении деталей каркаса летательных аппаратов (в замен используемой в настоящее время ручной слесарной обработки).

2. Разработка проекта станка «Установка для обработки кромок на длинномерных деталях типа профилей», предназначенного для механизации/автоматизации технологических процессов финишной обработки длинномерных деталей самолетов.

3. Разработка программных продуктов для выбора оптимальных режимных параметров процессов финишной обработки плоских поверхностей и скругления острых кромок с целью повышения эффективности производства деталей.

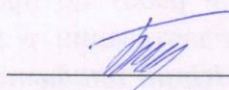
Результаты НИОКТР переданы заказчику для внедрения на Иркутском авиационном заводе – филиале ПАО «Корпорация «Иркут» с целью повышения производительности финишной обработки, качества обработки деталей и замены ручного труда на механизированный/автоматизированный.

Заместитель начальника УНД



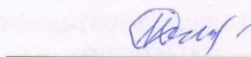
Иванов Ю.Н.

Заведующий кафедрой ТОМП



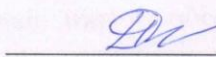
Пашков А.Е.

Профессор кафедры КСМ



Димов Ю.В.

Доцент кафедры КСМ



Подашев Д.Б.

**Ж.1. Расчет экономического эффекта от внедрения результатов диссертационной работы на Иркутском авиационном заводе – филиале ПАО «Корпорация «Иркут»**  
Исходные данные для расчета экономической эффективности приведены в таблице Ж.1.

**Таблица Ж.1 – Исходные данные для расчета экономической эффективности**

<b>Наименование показателя</b>	<b>Значение показателя</b>
Планируемый годовой выпуск продукции (самолетов МС-21), шт	20 в период 2021-2023 гг., до 70 после 2023 г.
Количество деталей из алюминиевых и титановых сплавов, на которых технологией предусмотрена зачистка поверхностей и/или скругление кромок (на 1 самолет МС-21), шт.	595, из которых: – 55 крупногабаритных или длинномерных, — – 540 – малогабаритных
Средняя трудоемкость отделочно-зачистных операций при ручной слесарной обработке, час	4,5 – крупногабаритная и/или длинномерная деталь; 0,5 – малогабаритная деталь
Средние затраты на электроэнергию при ручной слесарной обработке, кВт·час	0,1
Запланированные капитальные затраты на приобретение и пуско-наладку оборудования, млн. руб	22,36 на сегодняшний день; 65,45 – к 2023 г.
Норма амортизационных отчислений на оборудование, включая затраты на техническое обслуживание и ремонт, % от стоимости оборудования в год	15
Количество человек, обслуживающих единицу оборудования	1
Средняя стоимость комплекта инструмента для ручной слесарной обработки, руб	1500
Средняя стойкость комплекта инструмента для ручной слесарной обработки, час	2,5
Средняя часовая тарифная ставка, руб/час (в расчете на 1 работника)	94,97
Районный коэффициент + процентная надбавка за работу в местностях с особыми климатическими условиями (южные районы Иркутской области), руб/час (в расчете на 1 работника)	47,49
Отчисления на социальные нужды, руб/час (в расчете на 1 работника)	42,74
Средние общецеховые расходы, руб/час	166,67
Стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч	1,11

**Технологическая себестоимость выполнения операций при применяемой в настоящее время ручной слесарной обработке**

Необходимое количество работников–слесарей для выполнения рассматриваемых операций:

$$N_{сл} = \frac{K_c \cdot (K_{д.мг} \cdot T_{шт.мг} + K_{д.кг} \cdot T_{шт.кг})}{F_{эфф.раб} \cdot K_{вн}},$$

где  $K_c$  – количество самолетов МС-21, планируемых к выпуску в год (20 в период 2021–2023 гг, 70 – после 2023 г.);

$K_{д.мг}$  – количество малогабаритных деталей, подвергаемых отделочно-зачистным операциям в расчете на 1 самолет;

$K_{д.кг}$  – количество крупногабаритных и/или длинномерных деталей, подвергаемых отделочно-зачистным операциям в расчете на 1 самолет;

$T_{шт.мг}$  – средняя трудоемкость ручной слесарной обработки 1 малогабаритной детали, час;

$T_{шт.кг}$  – средняя трудоемкость ручной слесарной обработки 1 крупногабаритной и/или длинномерной детали, час;

$F_{эфф.раб}$  – годовой эффективный фонд времени работы, час (при 8-часовом рабочем дне, с учетом выходных и праздничных дней и ежегодного оплачиваемого отпуска 36 календарных дней равен 1688 часов);

$K_{вн}$  – коэффициент выполнения норм (принят  $K_{вн} = 1$ ).

В результате  $N_{сл} = 7$  человек (2021–2023 гг.) и  $N_{сл} = 22$  человека после 2023 г. с учетом запланированного объема выпуска самолетов МС-21.

Расходы на заработную плату работникам–слесарям (с учетом отчисления на социальные нужды):

$$C_{зп} = C_T \cdot K_{доп} \cdot N_{сл} \cdot F_{эфф},$$

где  $C_T$  – тарифная ставка рабочего–слесаря, руб/час,  $K_{доп} = 1,8$  – коэффициент, учитывающий обязательные расходы на социальные нужды, а также районный коэффициент и процентную надбавку за работу в местностях с особыми климатическими условиями (южные районы Иркутской области).

Таким образом, годовые расходы на заработную плату составят:  $C_{зп} = 2,02$  млн. руб. в год в 2021–2023 гг. и  $C_{зп} = 6,35$  млн. руб. после 2023 г.

В результате, технологическая себестоимость выполнения данных операций:

$$C_{общ} = C_{зп} + C_{эл} + C_{ин} + C_{цех},$$

где  $C_{эл}$  – расходы на электроэнергию, руб;  $C_{ин}$  – расходы на инструмент, руб;  $C_{цех}$  – общецеховые расходы, руб.

В период 2021 – 2023 гг., с учетом запланированного объема выпуска самолетов, технологическая себестоимость данных операций при ручной слесарной обработке составит:  $C_{\text{общ}} = 9,97$  млн. руб. в год. После 2023 г. – 34,22 млн. руб в год.

**Технологическая себестоимость выполнения операций при внедрении механизированной/автоматизированной обработки с применением полимерно-абразивного инструмента**

**Расчет капитальных вложений в приобретение и пуско-наладку технологического оборудования**

Годовой эффективный фонд времени работы единицы оборудования (при работе в две смены) можно определить по формуле:

$$F_{\text{эфф}} = 16 \cdot (D_p - D_v),$$

где  $D_p$  – количество дней в году;  $D_v$  – количество выходных праздничных дней в году.  
 $F_{\text{эфф}} \approx 3952$  час.

Необходимое количество оборудования:

$$N_{\text{об}} = \frac{K_c \cdot (K_{\text{д.мг}} \cdot T_{\text{об.мг}} + K_{\text{д.кг}} \cdot T_{\text{об.кг}})}{F_{\text{эфф}} \cdot K_{\text{вн}}},$$

$T_{\text{об.мг}}$  – средняя трудоемкость обработки 1 малогабаритной детали на оборудовании, час;

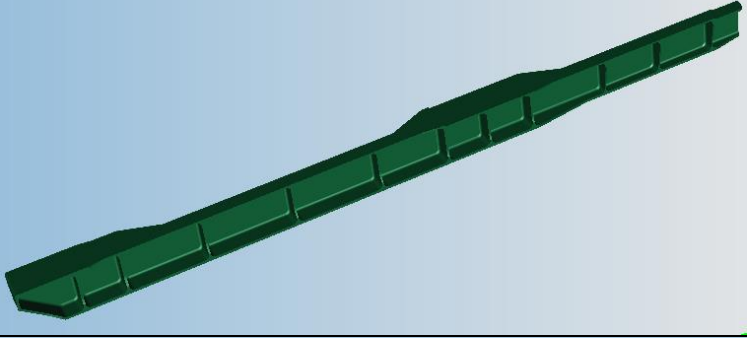
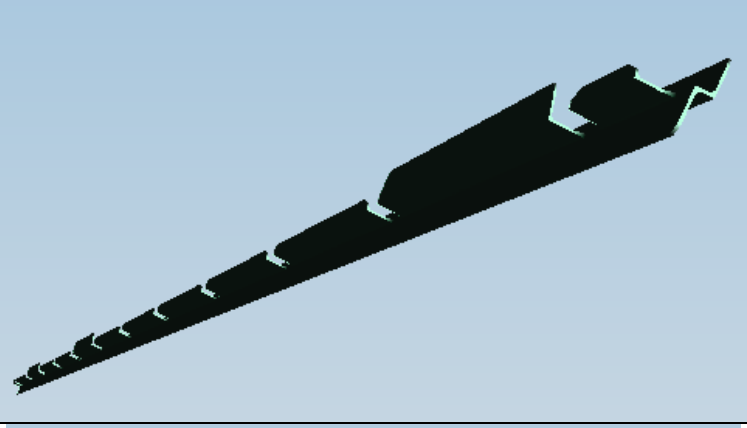
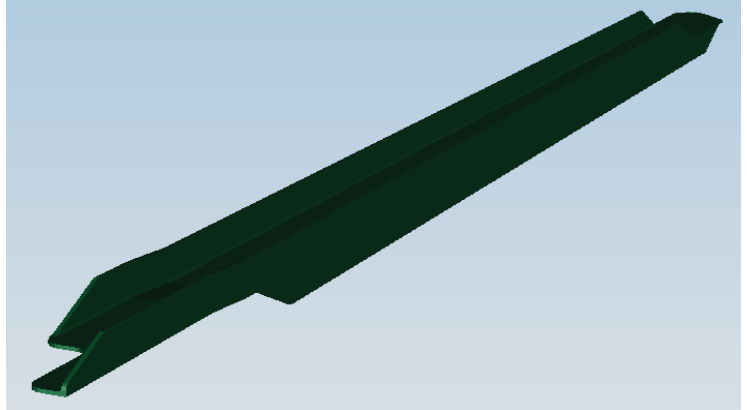
$T_{\text{об.кг}}$  – средняя трудоемкость обработки 1 крупногабаритной и/или длинномерной детали на оборудовании, час;

$F_{\text{эфф}}$  – годовой эффективный фонд времени работы единицы оборудования, час;

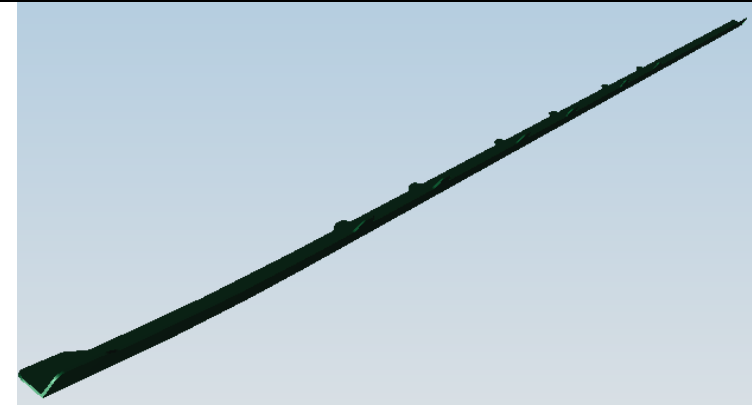
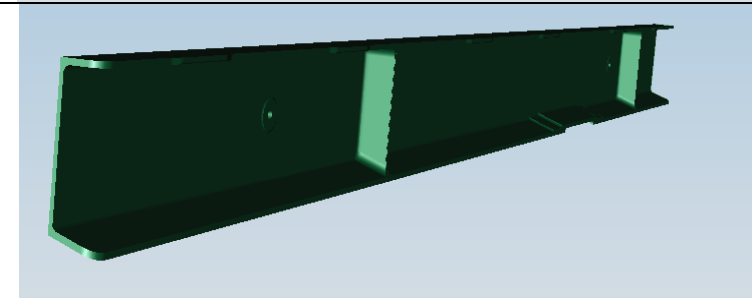
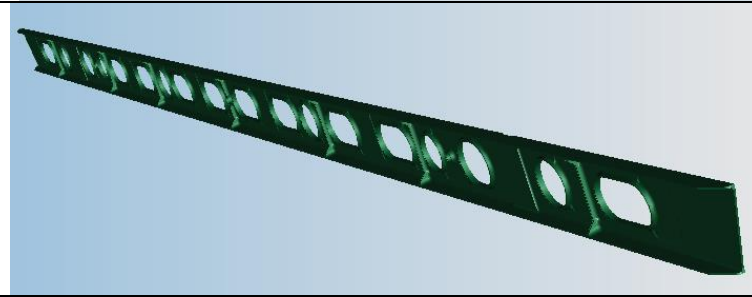
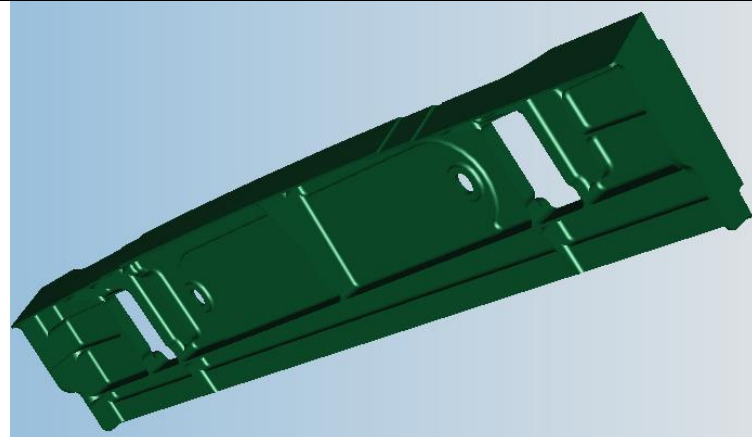
$K_{\text{вн}}$  – коэффициент выполнения норм (принят  $K_{\text{вн}} = 1$ ).

Трудоемкость механизированной/автоматизированной обработки деталей оценивалась с применением разработанного программного обеспечения (см. п. 7.3 и п. 7.6). С учетом индивидуальных особенностей каждой детали, сокращение трудоемкости выполнения рассматриваемых операций по сравнению с ручной слесарной обработкой в каждом конкретном случае разное. В качестве примера такие сведения приведены в таблице Ж.2 для нескольких длинномерных деталей типа лонжерон и стрингер. Названия и размеры деталей в данной таблице не приведены, поскольку эти сведения составляют государственную тайну.

Таблица Ж.2 – Трудоемкость отделочно-зачистных операций на примере длинномерных авиационных деталей

Общий вид детали	Трудоемкость отделочно-зачистных операций, час	
	до внедрения	после внедрения
	4	2,2
	4,6	2,9
	3,5	1,9

Окончание таблицы 7.5

	3,2	1,7
	4,4	2,4
	6,3	3,8
	5,2	3,6

После анализа полученных данных по снижению трудоемкости по всей номенклатуре деталей, сделан вывод о том, что в среднем трудоемкость снижается в 1,5 раза. Таким образом, для дальнейших усредненных расчетов,  $T_{об.мг.}$  принимаем равным 0,33 часа,  $T_{об.кг.} = 3$  часа.

Таким образом, определено необходимое количество оборудования:  $N_{об} = 2$  на период 2021–2023 гг.,  $N_{об} = 6$  на период после 2023 г.

Учитывая многономенклатурность рассматриваемого производства, разработанные технологии предполагается применять на следующем оборудовании:

- щеточная стационарная установка Fladder 400/Gyro (в настоящее время приобретена и внедрена в производство, планируется приобретение еще одной установки);
- универсальный обрабатывающий центр (аналогичный представленному на рисунке 2.17, приобретен и внедрен в производство, планируется приобретение еще одного центра);
- робототехнический комплекс на базе промышленного робота Kuka KR 210 R2700 Extra (см. рисунок 2.18) – планируется к приобретению Иркутским авиационным заводом в 2020-2022 гг.; с 2015 г. – установлен, апробирован и исследуется в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», в том числе и для рассматриваемых отделочно-зачистных операций (см. п. 6.1).
- специально сконструированный для обработки кромок длинномерных деталей станок с ЧПУ (см. п. 6.2) – ведется изготовление, планируется к внедрению в 2022 г.

Капитальные затраты с учетом приобретения, пуско-наладки, а также изготовления необходимой технологической оснастки всего перечисленного оборудования составляют 65,45 млн. руб. На сегодняшний день приобретено 2 наименования оборудования (с учетом планируемого выпуска: 20 самолетов МС-21 на период 2021–2023 гг.) на сумму 22,36 млн. руб.

#### ***Расходы на амортизацию технологического оборудования***

Годовые расходы на амортизацию оборудования можно представить в виде:

$$C_{\text{ам}} = \frac{C_{\text{ст}} \cdot A_0}{100},$$

где  $C_{\text{ст}}$  – стоимость оборудования, руб.;  $A_0$  – норма амортизационных отчислений на оборудование, включая текущие расходы на техническое обслуживание и ремонт оборудования и технологической оснастки (норматив для рассматриваемого производства – 15% от стоимости оборудования в год).

В период 2021 – 2023 гг., с учетом запланированного объема выпуска самолетов, расходы на амортизацию оборудования составят:  $C_{\text{ам}} = 3,35$  млн. руб. После 2023 г. – 9,82 млн. руб.

В результате, технологическая себестоимость выполнения операций:

$$C_{\text{общ}} = K_c \cdot K_{\text{cy}} \cdot K_{\text{кор}} \cdot (K_{\text{д.мг}} \cdot \text{ЦЭФ}_{\text{ср.мг}} + K_{\text{д.кг}} \cdot \text{ЦЭФ}_{\text{ср.кг}}) + C_{\text{ам}} + C_{\text{цех}},$$

где  $K_{\text{cy}}$  – коэффициент, учитывающий непредвиденный простой оборудования и расходы на случайную порчу инструмента (принят равным 1,2);  $K_{\text{кор}}$  – коэффициент, учитывающий необходимость проведения пробных операций с целью обеспечения стабильного качества обработки (принят равным 1,2);  $\text{ЦЭФ}_{\text{ср.мг.}}$  ( $\text{ЦЭФ}_{\text{ср.кг.}}$ ) – минимальная себестоимость выполнения операций по зачистке поверхностей и скруглению кромок малогабаритных (крупногабаритных) деталей. Рассчитывается с применением разработанных оптимизирующих программ (см. п. 7.3 и 7.6) и индивидуальна для каждой детали с учетом ее конструктивных особенностей и требований, предъявляемых соответствующими НТД. В расчетах технологической себестоимости изготов-

ления всех изделий принимаются средние значения, полученные на основе расчетов по всей номенклатуре деталей. Следует отметить, что  $ЦЭФ_{\text{ср.мг.}}$  ( $ЦЭФ_{\text{ср.кг.}}$ ) учитывают такие экономические показатели как: износ инструмента (см. зависимости (7.4) и (7.8)), затраты на электроэнергию (см. зависимости (7.3) и (7.7)), расходы, связанные с заработной платой и необходимыми отчислениями на социальные нужды, а также вспомогательное время операции. По результатам анализа себестоимости обработки всей номенклатуры деталей, установлено, что  $ЦЭФ_{\text{ср.мг}}$  составляет 125 руб., а  $ЦЭФ_{\text{ср.кг}}$  составляет 756 руб.

Таким образом, технологическая себестоимость выполнения операций составит:  $C_{\text{общ}} = 7,635$  млн. руб в 2021–2023 гг. с учетом планируемого выпуска в 20 самолетов МС-21 в год и  $C_{\text{общ}} = 24,82$  млн. руб в 2021–2023 гг. с учетом планируемого выпуска в 20 самолетов МС-21 в год.

Экономический эффект составит: до 2,4 млн. руб. в год в 2021–2023 гг. и до 9,4 млн. руб. в год после 2023 г., при условии реализации корпорацией «Иркут» текущих планов по выпуску самолетов МС-21.





**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе  
ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»

Смирнов В.В.

июня 2018 г.

### АКТ

внедрения результатов научно-исследовательской работы  
**Подашева Дмитрия Борисовича**  
в учебный процесс

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой «Технологии и оборудования машиностроительных производств» (ТОМП), доктор техн. наук, профессор *Пашков Андрей Евгеньевич* и автор научно-исследовательских работ, доцент кафедры «Конструирования и стандартизации в машиностроении» (КСМ), кандидат техн. наук *Подашев Дмитрий Борисович*, составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы, изложенные в докторской диссертации «*Развитие научных основ технологии финишной обработки деталей из алюминиевых и титановых сплавов полимерно-абразивными инструментами*», а также в монографии «*Финишная обработка деталей эластичными полимерно-абразивными инструментами*», внедрены в учебный процесс на кафедре ТОМП (программа практики, протокол №13 от «06» июня 2018 г.).

Указанные результаты включены в курс «Научно-исследовательская работа».

Направления подготовки: «15.04.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Наименование программы: «Механообработка деталей на высокопроизводительном оборудовании».

Заведующий кафедрой ТОМП *А.Е. Пашков* Пашков А.Е.

Доцент кафедры КСМ *Д.Б. Подашев* Подашев Д.Б.



## ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ ВНЕДРЕНИЯ результатов научных исследований

Общество с ограниченной ответственностью «Горсвет» в лице генерального директора Зуева Александра Юрьевича, действующего на основании Устава, и представители кафедры «Конструирования и стандартизации в машиностроении» ФГБОУ ВО ИрНТУ в лице доктора техн. наук, профессора Димова Юрия Владимировича, канд. техн. наук, доцента Подашева Дмитрия Борисовича, составили настоящий акт о том, что результаты научных исследований в области обеспечения эффективности финишной обработки эластичными полимерно-абразивными инструментами апробированы и внедрены в технологические процессы при осуществлении деятельности ООО «Горсвет» по направлению: «Техническое обслуживание и ремонт автотранспортных средств».

В период с 2016 по 2017 год апробированы и внедрены следующие разработки:

- технология зачистки поверхностей кузовных деталей автотранспортных средств, сварных швов и поверхности литых дисков от старого лакокрасочного покрытия, окалины, ржавчины, шпатлевки с целью подготовки поверхностей к нанесению лакокрасочных материалов при помощи электрической шлифмашинки и эластичных абразивных кругов компании ЗМ;
- рекомендуемые режимы и технологические рекомендации по применению эластичных абразивных кругов и щеток, обеспечивающие минимальную себестоимость выполнения операций;
- программное обеспечение, позволяющее рассчитывать в каждом конкретном случае оптимальные режимы обработки и минимальную себестоимость выполнения операций.

Проверка в реальных условиях указанных выше методов показывает, что их рациональное применение:

- существенно сокращает время простоя автотранспортных средств во время ремонта за счет снижения трудоемкости операции зачистки деталей;
- снижает общую себестоимость ремонта автотранспортных средств до 10% за счет повышения эффективности на этапе проведения подготовительных зачистных работ.

### ООО «Горсвет»

Юр. адрес: 664009, Россия, г. Иркутск,  
ул. Култукская, 67  
ИНН/КПП: 3812140529 / 384901001  
ОГРН: 1123850017500

Генеральный директор \_\_\_\_\_ Зуев А.Ю.



### Представители ФГБОУ ВО ИрНТУ:

профессор кафедры «Конструирования и стандартизации в машиностроении»,  
доктор техн. наук, профессор \_\_\_\_\_ Димов Ю.В.

доцент кафедры «Конструирования и стандартизации в машиностроении»,  
кандидат техн. наук \_\_\_\_\_ Подашев Д.Б.

**Ж.2. Расчет экономического эффекта от внедрения исследованного эффективного инструмента и рекомендаций, полученных в ходе выполнения диссертационной работы в ООО «Горсвет» (г. Иркутск)**

Проведен расчет эффективности от внедрения исследованных эффективных полимерно-абразивных инструментов в условиях авторемонтных мастерских взамен полностью ручной обработки при помощи шлифовальной шкурки. При кузовном ремонте автомобилей вращающиеся эластичные полимерно-абразивные инструменты могут успешно применяться при следующих технологических операциях:

- подготовка поверхностей для окраски (удаление старого лакокрасочного покрытия);
- нанесение рисок («матование») непосредственно перед покраской.

Исходные данные для расчета экономической эффективности приведены в таблице Ж.3.

**Таблица Ж.3 – Исходные данные для расчета экономической эффективности**

<b>Наименование показателя</b>	<b>Значение показателя</b>
Среднегодовой объем работ автосервиса (количество деталей, подвергаемых окраске), шт	360
Средняя трудоемкость отделочно-зачистных операций при полностью ручной обработке при помощи шлифовальной шкурки, час на 1 деталь	3
Средняя трудоемкость отделочно-зачистных операций при полуавтоматической обработке полимерно-абразивными инструментами (установлена опытным путем), час	2,2
Необходимые затраты на приобретение оборудования, руб	6000
Необходимые затраты на приобретение полимерно-абразивного инструмента, руб в год	50000
Норма амортизационных отчислений на оборудование, включая затраты на техническое обслуживание и ремонт (% от стоимости оборудования в год)	15
Количество человек, использующих единицу оборудования	1
Средняя стоимость комплекта инструмента для ручной слесарной обработки (руб. за погонный метр)	1500
Средняя стойкость комплекта инструмента для ручной слесарной обработки, час	20
Стоимость нормочаса работы (включая все отчисления на социальные нужды), руб.	500
Стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч	1,11
Средний расход электроэнергии при ручной обработке, кВт·ч	0,75
Средний расход электроэнергии при полуавтоматической обработке, кВт·ч	1,8
Общие расходы автосервиса, руб/час	250

*Технологическая себестоимость выполнения операций при ручном выполнении  
отделочно-зачистных операций при помощи шлифовальной шкурки*

$$C_{\text{общ}} = C_{\text{зп}} + C_{\text{эл}} + C_{\text{ин}} + C_{\text{цех}} = 540000 + 900 + 81000 + 270000 = \mathbf{891900} \text{ руб.},$$

где  $C_{\text{зп}}$  – расходы на заработную плату, руб.;  $C_{\text{эл}}$  – расходы на электроэнергию, руб.;  $C_{\text{ин}}$  – расходы на инструмент, руб.;  $C_{\text{цех}}$  – общие расходы автосервиса, руб.

*Технологическая себестоимость выполнения операций при внедрении  
полуавтоматической обработки с применением полимерно-абразивного инструмента*

$$\begin{aligned} C_{\text{общ}} &= K_{\text{cy}} \cdot (0,15 \cdot C_{\text{ам}} + C_{\text{ин}}) + C_{\text{зп}} + C_{\text{эл}} + C_{\text{цех}} = \\ &= 1,2 \cdot (0,15 \cdot 6000 + 50000) + 396000 + 1582 + 198000 = \mathbf{656662} \text{ руб.}, \end{aligned}$$

где  $K_{\text{cy}}$  – коэффициент, учитывающий непредвиденный простой оборудования и расходы на случайную порчу инструмента (принят равным 1,2).

Таким образом, годовой экономический эффект от внедрения полуавтоматической обработки с применением результатов исследований и эффективных полимерно-абразивных инструментов составляет до 235 тыс. рублей в год.



Общество с ограниченной ответственностью «Беркут»  
664024, г. Иркутск, ул. Тракторная, 18А, оф.3  
ИНН 3810062924, КПП 381001001,  
ОГРН 1163850060637,  
ОКПО 00643063

**АКТ**  
использования результатов научных исследований

Мы, нижеподписавшиеся, директор ООО «Беркут» Искулова А.С., и доцент кафедры «Конструирования и стандартизации в машиностроении» ФГБОУ ВО ИрННТУ, канд. техн. наук Подашев Д.Б. составили настоящий акт о том, что результаты научных исследований по теме финишной обработки эластичными полимерно-абразивными инструментами были использованы при ремонте офисных помещений ООО «Беркут» в 2017 году.

Во время ремонта офисных помещений общей площадью 255 м<sup>2</sup> были апробированы и использованы следующие разработки:

- технология шлифовки стен после оштукатуривания и нанесения шпаклевки с целью их дальнейшей подготовки к окраске с помощью электрической шлифмашинки и эластичных абразивных кругов компании ЗМ;

- технология финишного шлифования бетонной стяжки пола с целью дальнейшей укладки чистового напольного покрытия;

- рекомендуемые режимы и технологические рекомендации по применению эластичных абразивных кругов, обеспечивающие минимальную себестоимость выполнения операций;

- программное обеспечение, позволяющее определять оптимальные режимы обработки и минимальную себестоимость выполнения операций в каждом конкретном случае.

Проверка в реальных условиях указанных выше методов показывает, что их рациональное применение:

- сокращает время, затрачиваемое на финишные операции во время строительства и ремонта за счет снижения трудоемкости операций финишной обработки в 2-2,5 раза, по сравнению с полностью ручными методами и другими инструментами;

- снижает себестоимость финишных чистовых операций в 2,5-3 раза.

В результате, применение предложенных рациональных методов и технологий позволили получить экономический эффект порядка 30 тыс. рублей при ремонте помещений вышеуказанной площади.

Представитель ФГБОУ ВО ИрННТУ:  
доцент кафедры «Конструирования и стандартизации  
в машиностроении», канд. техн. наук



Подашев Д.Б.

Директор ООО «Беркут»



Искулова А.С.

**Ж.3. Расчет экономического эффекта от внедрения исследованного эффективного инструмента и рекомендаций, полученных в ходе выполнения диссертационной работы в ООО «Беркут» (г. Иркутск)**

Проведен расчет эффективности от внедрения исследованных эффективных полимерно-абразивных инструментов при ремонте помещений взамен полностью ручной обработки при помощи шлифовальной шкурки. При строительстве и ремонте помещений, вращающиеся полимерно-абразивные инструменты могут успешно применяться при следующих технологических операциях:

- шлифовка стен после оштукатуривания и шпатлевания;
- финишная шлифовка бетонной стяжки пола.

Исходные данные для расчета экономической эффективности приведены в таблице Ж.4.

**Таблица Ж.4 – Исходные данные для расчета экономической эффективности**

Наименование показателя	Значение показателя
Запланированный объем ремонтных работ, м <sup>2</sup>	255
Общая трудоемкость отделочно-зачистных операций при полностью ручной обработке при помощи шлифовальной шкурки, час	86
Общая трудоемкость отделочно-зачистных операций при полуавтоматической обработке полимерно-абразивными инструментами (установлена опытным путем), час	34
Необходимые затраты на приобретение оборудования, руб	6000
Необходимые затраты на приобретение полимерно-абразивного инструмента, руб	9000
Количество человек, использующих единицу оборудования	1
Общая стоимость инструмента для ручной слесарной обработки, руб.	1500
Стоимость нормочаса работы (включая все отчисления на социальные нужды), руб.	400
Стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч	1,11
Расход электроэнергии при ручной обработке, кВт·ч	1,2
Расход электроэнергии при полуавтоматической обработке, кВт·ч	24
Расходы компании от простоя помещения из-за ремонта, руб/час	500

*Технологическая себестоимость выполнения операций при ручном выполнении отделочно-зачистных операций при помощи шлифовальной шкурки*

$$C_{\text{общ}} = C_{\text{зп}} + C_{\text{эл}} + C_{\text{ин}} + C_{\text{пм}} = 34400 + 10 + 1500 + 43000 = \mathbf{78910} \text{ руб.},$$

где  $C_{зп}$  – расходы на заработную плату, руб.;  $C_{эл}$  – расходы на электроэнергию, руб;  $C_{ин}$  – расходы на инструмент, руб;  $C_{пм}$  – расходы, связанные с простоем помещения, руб.

***Технологическая себестоимость выполнения операций при внедрении  
полуавтоматической обработки с применением полимерно-абразивного инструмента***

$$C_{общ} = K_{cy} \cdot C_{ин} + C_{об} + C_{зп} + C_{эл} + C_{пм} = \\ = 1,2 \cdot 9000 + 6000 + 13600 + 45 + 17000 = \mathbf{47445} \text{ руб,}$$

Где  $C_{об}$  – стоимость оборудования (шлифмашинки), руб.  $K_{cy}$  – коэффициент случайной убыли, учитывающий расходы на случайную порчу инструмента (принят равным 1,2).

Таким образом, экономический эффект от внедрения полуавтоматической обработки с применением результатов исследований и эффективных полимерно-абразивных инструментов составляет 31 465 рублей при выполнении отделочно-зачистных операций в помещении общей площадью 255 м<sup>2</sup> за счет существенного снижения трудоемкости выполнения данных операций и сокращения времени простоя помещения.