

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Иркутск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» на кафедре «Конструирования и стандартизации в машиностроении»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Димов Юрий Владимирович

Официальные оппоненты:

Братан Сергей Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» (г. Севастополь),
кафедра «Технология машиностроения»,
заведующий кафедрой

Зверовщиков Александр Евгеньевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (г. Пенза), кафедра «Технология машиностроения», заведующий кафедрой

Макаров Владимир Федорович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (г. Пермь), кафедра «Инновационные технологии машиностроения», профессор

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону)**

Защита состоится «17» октября 2019 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.073.02 в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет». Адрес сайта: <http://www.istu.edu>.

Автореферат разослан «2» сентября 2019 г.

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации) просьба высылать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»; ученому секретарю диссертационного совета Д 212.073.02 Салову В.М., e-mail: salov@istu.edu, тел./факс: (3952) 40-51-17.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, профессор



В.М. Салов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

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, при изготовлении длинномерных деталей типа профилей, после фрезерования, в обязательном порядке требуется скругление острых кромок. Данные операции, как правило, выполняются вручную, на что тратится существенная трудоемкость. 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, а также других сферах инженерной деятельности, когда 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 кромки. 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.

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 полимерноабразивными 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.

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, подтверждающих 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.

Методология и методы исследования. При выполнении работы были использованы современный математический аппарат, основополагающие фундаментальные положения физических процессов удара, теории упругости и 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 инстру-

ментами, 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 скруглении 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.

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*).

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.

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.

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, выявленные 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована научная новизна, цель и задачи исследования, практическая значимость работы, определены положения, выносимые на защиту, описана методология и методы исследований.

В первой главе рассмотрены существующие технологии финишной обработки деталей эластичными абразивными инструментами, а также инструментальное и станочное обеспечение финишной обработки деталей.

На основе работ отечественных и зарубежных исследователей (Ю.Д. Абрашкевича, И.А. Биргера, М.И. Гринченко, Ю.В. Димова, С.Н. Корчака, В.Ф. Макарова, Г.М. Мачишина, В.И. Свирщева, Д.Ф. Устиновича, Л.В. Худобина, П.И. Ящерицына, X. Huang, X. Wu и многих других) рассмотрено текущее состояние вопроса в области теоретических и экспериментальных исследований процесса резания абразивным зерном, взаимодействия эластичного абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью, микрогеометрии режущей поверхности эластичных абразивных инструментов, износостойкости инструмента, производительности процесса обработки и качества обработанной поверхности, остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое после механообработки, а также варианты решения задачи по эффективной обработке эластичным полимерно-абразивным инструментом и рациональной области его применения.

По итогам обзора опубликованных работ доказана актуальность работы, сформулированы научная новизна, практическая значимость, цель и задачи исследований, которые изложены в общей характеристике работы.

Во второй главе представлена система оптимального управления проектированием операций финишной обработки полимерно-абразивными инструментами.

Установлено, что для изучения и эффективного применения управления процессом финишной обработки 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.

Целью системного анализа рассматриваемой технологической операции является разработка единого методологического подхода к проектированию операции финишной обработки эластичными полимерно-абразивными инструментами по обеспечению требуемого качества с оптимальной производительностью процесса при большом разнообразии конструкций инструментов, форм обрабатываемых поверхностей и их взаимного расположения.

Любое научное исследование связано с установлением зависимости *воздействие – результат*. Воздействие подается на вход объекта (системы), результат фиксируется на выходе. При этом вся система оптимального управления проектированием операций финишной обработки полимерно-абразивными инструментами (далее сокращенно: *система управления финишной обработкой*) должна быть построена на использовании формализованного представления динамической системы в пространстве состояний.

Система управления финишной обработкой относится к сложной системе. Архитектура такой системы 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 1 приведена схема системы управления финишной обработкой.

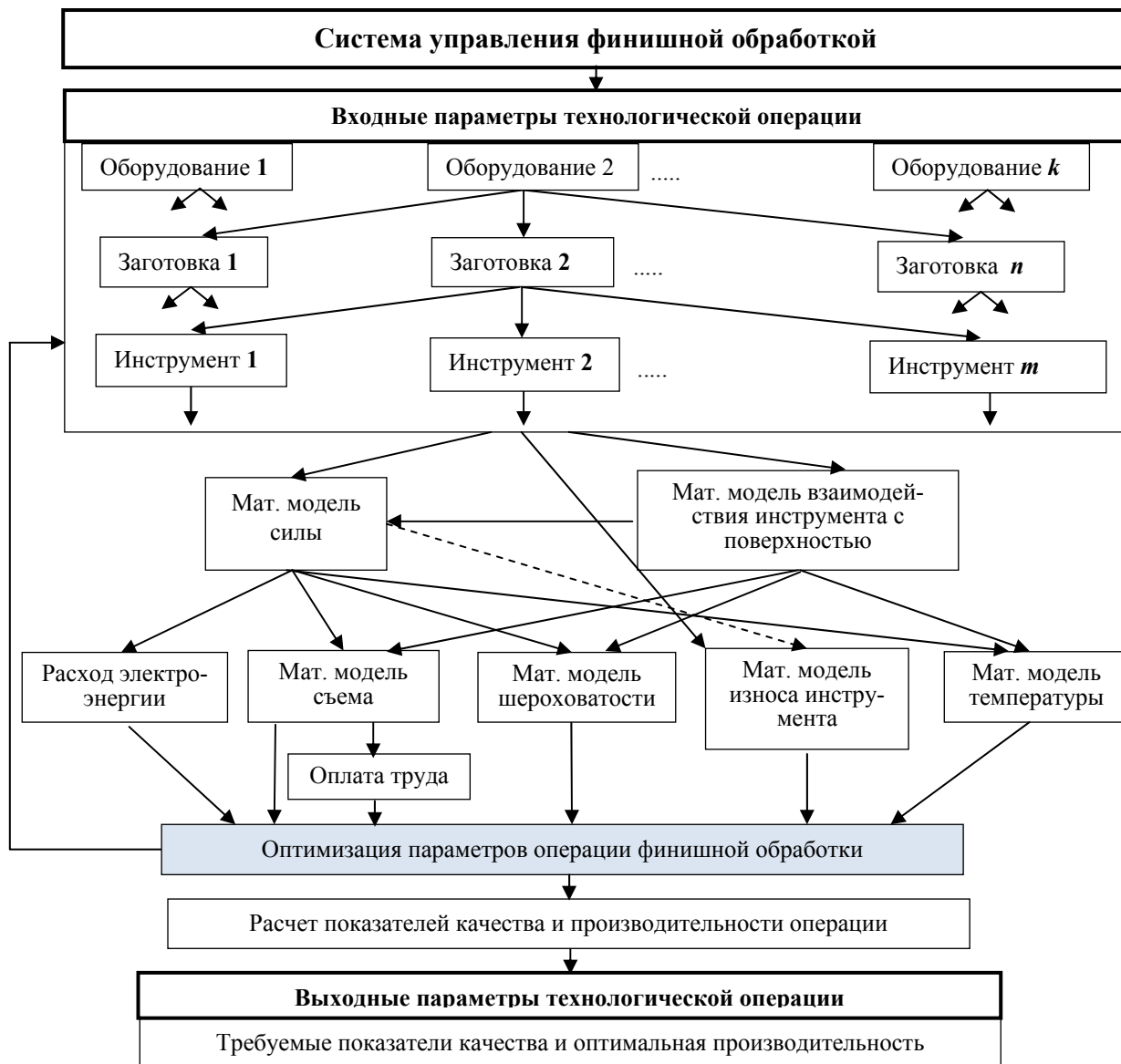


Рисунок 1 – Система управления финишной обработкой

В приведенной на рисунке 1 схеме, *входными* параметрами (*система второго уровня*) являются: оборудование (станок с ЧПУ, робот, специальный станок, универсальный станок); заготовка (конструкция, материал, шероховатость, предел текучести, модуль упругости, механические свойства поверхностного слоя); инструмент (конструкция, материал, зернистость, модуль упругости, жесткость, плотность, температура плавления, износостойкость).

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

Информация по входным параметрам поступает в *системы 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 систему того же уровня – «Математическую модель силы».

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

Информация из всех систем четвертого уровня поступает в *управляющую подсистему* «Оптимизация параметров операции финишной обработки», относящуюся к *системе пятого уровня*. Для выбора оптимального инструмента информация передается в систему 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.

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. Система управления финишной обработкой позволяет минимизировать влияние приведенных возмущающих факторов.

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 и решение вопросов применимости для выполнения рассматриваемых финишных операций в производственных условиях различных видов оборудования (промышленных роботов, станков с ЧПУ, специально разработанного оборудования и т.д.).

Для проведения экспериментальных исследований финишной обработки использовались эластичные полимерно-абразивные круги, радиальные и торцевые щетки компании 3М (Minnesota Mining and Manufacturing Company (США)), изготовленные из абразивного материала Scotch-Brite™.

Исследование финишной обработки проводилось на образцах из высокопрочного алюминиевого (В95ПчТ2) и титанового сплава (ВТ20) с использованием следующего оборудования: вертикальный обрабатывающий центр Deckel Maho DMC 635V (Германия), робототехнический комплекс на базе промышленного робота KUKA KR 210 R2700 EXTRA (Германия), 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).

Для вышеуказанных инструментов обосновано и использовано планирование эксперимента с помощью латинского квадрата. Для экспериментальных исследований обосновано применение методов математической статистики, основанных на дисперсионном и регрессионном анализе. Выбор вида регрессионных уравнений обоснован их достаточной надежностью и адекватностью.

В третьей главе представлена реализация системы управления финишной обработкой эластичными полимерно-абразивными инструментами в части создания 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.

В основу вышеперечисленных исследований положены теоретические положения взаимодействия режущего микрорельефа эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью.

Установлено, что одним из способов определения параметров режущей поверхности абразивного зерна является статистическое исследование действительного микрорельефа (среднее квадратичное отклонение профиля σ , число максимумов m , число нулей (пересечений со средней линией) $n(l)$, отношение $\lambda = n(o)/m$ с помощью профилографирования, которое было проведено на приборе Taylor Hobson Form Talysurf i200 с использованием слепков режущего микрорельефа и контрслепков для получения реальной картины микронеровностей.

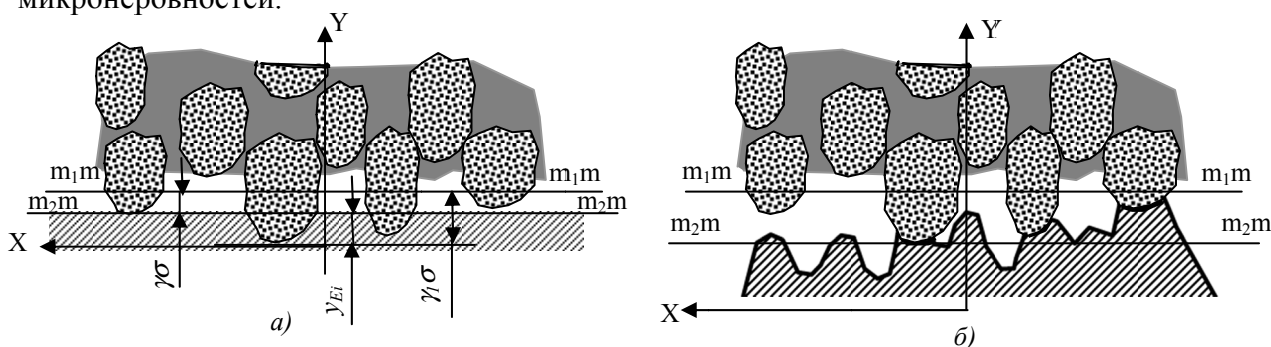


Рисунок 2 – Схема взаимодействия эластичного круга с поверхностью детали:

а – идеально гладкой; *б* – шероховатой

На основании экспериментально полученных данных о микрорельефе эластичных полимерно-абразивных кругов, рассчитаны математические ожидания количества зерен, находящихся в контакте с обрабатываемым материалом, и глубины их внедрения.

Рассмотрено взаимодействие режущего микрорельефа как с идеально гладкой поверхностью (рисунок 2, *а*), так и с шероховатой поверхностью (рисунок 2, *б*). При этом

математическое ожидание глубины внедрения выступов, пластически деформирующего материал, т.е. выступов, расположенных ниже относительного уровня сечения $\gamma \cdot \sigma$, можно записать в виде:

$$E(\gamma_E) = \sigma \cdot [E(\gamma_0) - \gamma], \quad (1)$$

где $E(\gamma_0)$ – математическое ожидание относительных высот максимумов, $\gamma = y/\sigma$ – значение сближения и расстояние любой точки поверхности m_2m_2 до средней линии микрорельефа m_1m_1 в относительных величинах (см. рисунок 2).

Путем математических преобразований и решения уравнений численным методом для $E(\gamma_0)$ получена упрощенная формула:

$$E(\gamma_0) = \gamma^{0,802} + 0,97. \quad (2)$$

Установлено, что для случая сближения шероховатого рельефа, имеющего плоскую среднюю поверхность, с идеально гладкой поверхностью при нормированной корреляционной функции, количество зерен контакта на площади 1 мм^2 $E(N)$ определяется по уравнению:

$$E(N) = \frac{\pi \cdot n^2(0)}{2\sqrt{2\pi}} \cdot \gamma \cdot e^{-\left(\frac{\gamma^2}{2}\right)}. \quad (3)$$

Полученные уравнения математического ожидания средней глубины внедрения режущих выступов и количества зёрен эластичного полимерно-абразивного круга, находящихся в контакте, позволяют разработать математические модели съема материала и формирования параметров шероховатости обработанной поверхности. При этом сближение $\gamma \sigma$ (см. рисунок 2) зависит от нормальной составляющей силы резания.

Для вычисления радиуса кривизны вершин выступов получена формула:

$$E(r_1) = \frac{3\sqrt{\pi}}{16\pi^2 \cdot m \cdot n(0) \cdot \sigma}. \quad (4)$$

В уравнении (4) приведено среднее значение радиуса кривизны вершин на всем режущем микрорельефе. Исследования показали, что при обработке эластичным полимерно-абразивным кругом в процессе резания участвуют вершины зерен при очень малой глубине внедрения $E(\gamma_E)$. Поэтому реальный радиус зависит от режимов обработки: скорости резания (V), деформации (ΔY) эластичного полимерно-абразивного круга и подачи (S).

По аналогии рассмотрено взаимодействие режущего микрорельефа с наружной цилиндрической и внутренней цилиндрической поверхностями.

На основе предложенных теоретических положений взаимодействия режущего микрорельефа эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью, *разработана математическая модель сил* резания. Разработка данной математической модели позволяет *вычислить целевую функцию расхода электроэнергии, необходимую для разработки управляющей подсистемы «Оптимизация параметров операции финишной обработки»*, а также определять требуемую мощность металлообрабатывающего оборудования и прогнозировать производительность процесса обработки, формирование поверхностного слоя, температуру в зоне резания, износ инструмента.

Нормальная составляющая силы обработки P_y определяет глубину внедрения режущих элементов эластичного полимерно-абразивного круга, а, следовательно, производительность процесса обработки и шероховатость обработанной поверхности. Установлено, что нормальная составляющая силы возникает при взаимодействии вращающегося круга с обрабатываемой поверхностью и состоит из упруго-вязкой и центробежной составляющих:

$$P_y = P_{yn} + P_{y\omega}. \quad (5)$$

Обосновано, что для эластичного полимерно-абразивного круга в инженерных расчетах целесообразно принять линейный закон напряжений и линейный закон деформаций.

Тогда напряжение в зоне контакта круга с обрабатываемой поверхностью:

$$\sigma_H = C_r \cdot d \cdot \varepsilon + \chi \cdot \dot{\varepsilon}_B - n_B \cdot \dot{\sigma}_B, \quad (6)$$

где C_r – жесткость материала круга на единицу площади, Н/(мм²·мм); d – длина деформированного участка круга; $d = R_k - r_k$ (R_k – радиус круга, мм; r_k – радиус втулки круга, мм);

ε – относительная средневзвешенная деформация круга: $\varepsilon = \frac{\Delta Y_C}{d}$ (ΔY_C – средневзвешенная деформация круга, мм), $\dot{\sigma}_B$ – скорость напряжений при вязкой деформации, определяется по формуле: $\dot{\sigma}_B = \frac{\sigma_B}{t_B}$ (σ_B – увеличение напряжения при упруго-вязком восстановлении, зависящее от жесткости материала круга на единице площади C_r ; t_B – время восстановления круга после деформирования, с; χ – коэффициент линейной вязкости материала круга; n_B – экспериментально определенный коэффициент, характеризующий изменение скорости напряжений, который зависит от режимных параметров обработки (деформации круга ΔY (мм), скорости резания V (м/мин) и подачи S (мм/мин)).

Комплекс экспериментальных исследований по определению жесткости эластичных полимерно-абразивных кругов, модуля упругости первого рода и упруго-вязкого восстановления после деформации круга был проведен на специально изготовленной установке. Некоторые из исследованных характеристик эластичных полимерно-абразивных кругов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики исследованных эластичных полимерно-абразивных кругов

Марка круга	D_k , мм	B_k , мм	r_k , мм	d_k , мм	M_k , кг	γ_k , кг/м ³	Абразив	Зернистость Z, мкм	Жесткость C_r , Н/(мм ² ·мм)
FS-WL-8AMED	140,5	26	17,5	25,4	0,278	712,77	Al ₂ O ₃	50-60	0,4648
FS-WL-6SFIN	129,5	25,5	17,5	25,4	0,162	501,63	SiC	45-50	0,1853
FS-WL-2SCRS	147,2	26	17,5	25,4	0,162	377,37	SiC	~100	0,0993
DB-WL-8SMED	147,8	25,6	17,5	25,4	0,284	666,29	SiC	50-60	0,29
CF-FB-0,5AFIN	193	50	45	76,5	0,418	339,03	Al ₂ O ₃	45-50	0,0162

D_k – диаметр круга, мм; B_k – ширина круга, мм; r_k – радиус втулки круга, мм; d_k – диаметр посадочного отверстия, мм; M_k – масса круга, кг; γ_k – плотность материала круга, кг/м³; C_r – средняя жесткость на площади 1 мм², Н/(мм²·мм)

Поскольку напряжение в материале круга σ_n в период взаимодействия с деталью остается неизменным, в соответствии с уравнением (6), упругая составляющая силы будет равна:

$$P_{yn} = \sigma_n \cdot S_B,$$

где S_B – площадь контакта круга с обрабатываемой поверхностью после упруго-вязкого восстановления на 1 мм ширины.

Центробежная сила, действующая на обрабатываемый материал, рассчитана по формуле:

$$P_{ц} = \frac{m_d \cdot v_{ц}^2}{R_{ц}},$$

где $v_{ц}$ – скорость вращения центра тяжести деформированного материала круга (м/с); $R_{ц}$ – расстояние от центра круга до центра тяжести, мм; m_d – масса деформированного материала круга, кг.; $m_d = \gamma_k \cdot S_{пл}$; γ_k – плотность материала круга (кг/м³), $S_{пл}$ – площадь, равная объему упруго деформированного материала круга на 1 мм ширины круга (м³).

Объем упруго деформированного материала эластичного полимерно-абразивного круга, необходимый для расчета центробежной составляющей силы, определен аналитическим путем на основе известного решения задачи о сосредоточенной силе, приложенной к точке прямолинейного края полу-бесконечной пластинки из теории упругости.

Таким образом, в диссертационной работе полностью решена задача по определению всех составляющих упругой P_{yn} и центробежной $P_{ц}$ составляющих силы P_y (5).

Также аналитически доказано, что по известной P_y можно определить значение P_z из выражения: $P_z = P_y \cdot 0,4915 \varepsilon_E^{0,105}$,

где ε_E – относительная величина внедрения зерен: $\varepsilon_E = E(y_E)/E(r)$.

Адекватность разработанной теоретической математической модели определения сил резания подтверждена комплексом экспериментальных исследований.

Основной характеристикой производительности процесса обработки является съём материала. На базе разработанных теоретических положений взаимодействия режущего микрорельефа эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью, создана математическая модель съёма материала.

Формула съема материала с единицы площади запишется в следующем виде:

$$Q = B \cdot l \cdot Q_c \cdot T \cdot n, \quad (7)$$

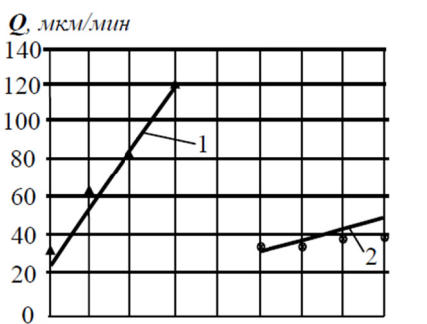
где B – ширина обработки, мм; n – частота вращения круга, об/мин; T – время обработки, мин; l – длина обрабатываемой поверхности, мм; Q_c – объем материала, срезанный эластичным полимерно-абразивным кругом за один оборот на единице ширины (1 мм) при перемещении в контакте с обрабатываемой поверхностью на длину 1 мм:

$$Q_c = S_c \cdot E(N) \cdot 2\pi \cdot R_k \cdot L_k,$$

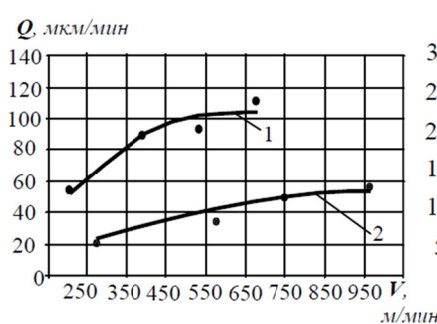
где S_c – площадь поперечного сечения стружки на единичном зерне (зависит от глубины внедрения зерен (1) и определена аналитически); L_k – длина участка контакта при заданной деформации круга ΔY , мм; $E(N)$ – количество зерен контакта на площади 1 мм² (3). При расчете съема материала по формуле (7), экспериментально установлено и учтено изменение механических свойств материала в тонком поверхностном слое и реальный радиус кривизны вершин закругления абразивных зерен, зависящий от режимов обработки.

Для подтверждения адекватности предложенной математической модели проведены расчет съема материала по формуле (7) и экспериментальные исследования в зависимости от режимов обработки: деформации круга ΔY , скорости резания V и продольной подачи S . Экспериментальные данные по съему материала получены путем определения массы образца до и после обработки.

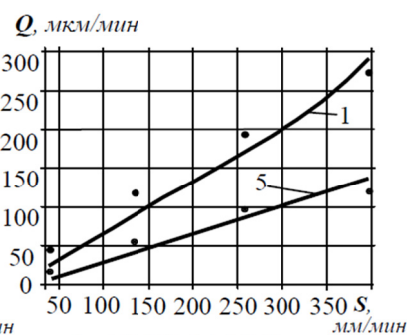
В качестве примера, на рисунках 3–5 приведены зависимости съема материала Q от режимов обработки для двух исследованных инструментов. Линиями показаны зависимости, рассчитанные по разработанной математической модели, точками – результаты экспериментальных исследований.



1 – FS-WL 8A MED при $V = 441,4$ м/мин; 2 – CF-FB 0,5A FIN при $V = 606,3$ м/мин
Рисунок 3 – Зависимость относительного съема материала Q от деформации ΔY при $S = 130$ мм/мин для кругов



1 – FS-WL 8A MED при $\Delta Y = 1,5$ мм; 2 – CF-FB 0,5A FIN при $\Delta Y = 4,5$ мм.
Рисунок 4 – Зависимость относительного съема материала Q от скорости резания V при $S = 130$ мм/мин для кругов



1 – FS-WL 8A MED при $V = 441,4$ 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 5 – Зависимость относительного съема материала Q от подачи S для кругов

На основе теоретических положений взаимодействия режущего микрорельефа эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью, разработана аналитическая математическая модель формирования **шероховатости обработанной поверхности**. Высота неровностей по 10-ти точкам R_z представляет собой среднюю глубину внедрения зерен с учётом наплыва и упругого восстановления царапин: $R_z = Y_G - W_{VA}$, где Y_G – глубина внедрения зерен в обрабатываемый материал с учетом наплыва материала при царапании; W_{VA} – упругое восстановление материала после прекращения воздействия зерна на материал. В диссертации приведены аналитические расчеты Y_G и W_{VA} , проведенные на основе использования информации о глубине внедрения абразивных зерен (1) и радиуса кривизны вершин выступов (4).

Среднее арифметическое отклонение профиля R_a напрямую зависит от параметра R_z .

Для подтверждения адекватности разработанной математической модели проведены экспериментальные исследования достижимой шероховатости обработанной поверхности по параметру R_a при обработке высокопрочного алюминиевого сплава В95ПчТ2 эластичными полимерно-абразивными кругами. Установлено, что предложенная математическая

модель формирования шероховатости обработанной поверхности хорошо коррелирует с экспериментальными данными.

Одним из главных факторов, определяющих процесс износа инструмента, является **температура резания**. Эластичный абразивный инструмент со связкой из полимера очень чувствителен к температуре, возникающей в процессе обработки. Высокая температура может привести к оплавлению поверхностного слоя круга, что недопустимо. Поэтому при назначении режимов обработки необходимо учитывать температуру, возникающую при резании.

Аналитическая математическая модель температуры, возникающей в зоне взаимодействия режущего микрорельефа эластичного полимерно-абразивного круга с обрабатываемой поверхностью, реализована на основе разработанной математической модели сил резания с использованием известного метода источников. В роли единичного источника в данном случае выступает единичное зерно эластичного полимерно-абразивного круга.

Известно, что в зоне резания возникают три основных источника теплоты (рисунок 6):

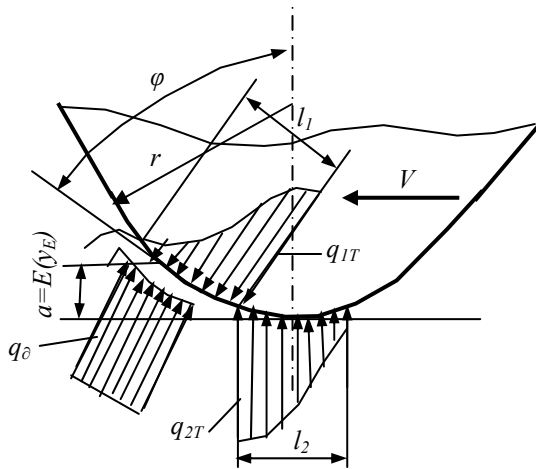


Рисунок 6 – Схематизация режущего выступа абразивного зерна и расположение источников тепловыделения

1. Теплота деформации в зоне стружкообразования (интенсивность источника q_{δ}). Температура в зоне действия единичного зерна эластичного полимерно-абразивного при интенсивности источника q_{δ} определится уравнением:

$$\Theta_{\delta} \approx \frac{0,3352\omega}{1+0,5\sqrt{\frac{\omega}{V \cdot a}}} \cdot \frac{P_z^1 - 0,26P_y^1}{\lambda \cdot a^2}, \quad (8)$$

где P_z^1, P_y^1 – средние значения тангенциальной и нормальной составляющих сил резания на единичном зерне; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(см·°C); ω – коэффициент температуропроводности, см²/с; V – скорость круга, м/с; $a = E(y_E)$ – глубина внедрения выступов абразивных зерен в обрабатываемый материал, мм (см. формулу (1) и рисунки 2 и 6).

2. Теплота трения на площадке контакта между стружкой и передней поверхностью инструмента (q_{1T}):

$$q_{1T} = 6,327 \cdot \frac{V}{a^2} \cdot (P_y^1 - P_z^1).$$

Тогда средневероятная температура на поверхности контакта стружки без учета теплоотвода в зерно при ширине стружки $b \approx 2a$ и усадке стружки $k \approx 2$ запишется выражением:

$$\Theta_c = \Theta_{\delta} + \frac{0,0183}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot l_1}{V}} \cdot q_{1T}, \quad (9)$$

где l_1 – длина контакта по передней поверхности зерна, мм.

3. Теплота трения между задними поверхностями инструмента с деталью (q_{2T}):

$q_{2T} = 50,0286 \cdot \mu_2 \cdot \sigma_b \cdot V$, где μ_2 – коэффициент трения; σ_b – временное сопротивление разрыву материала детали, МПа. Тогда средневероятная температура на поверхности контакта детали без учета отвода тепла в зерно:

$$\Theta_{и} = \Theta_{\delta} \cdot T_{и} + \frac{0,013}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot l_2}{V}} \cdot q_{2T}, \quad (10)$$

где $T_{и}$ – функция, отображающая закон распределения температур на площадке контакта детали с зерном, вызванных теплотой деформации; l_2 – длина контакта по задней поверхности зерна, мм.

После определения всех составляющих формул (8), (9), (10), проведен расчет средневероятной локальной температуры на поверхностях контакта зерна с деталью, а также средней температуры на участке между двумя соседними зернами. Данный расчет прове-

ден на основе разработанных теоретических положений взаимодействия режущего микрорельефа с обрабатываемой поверхностью с использованием уравнений глубины внедрения зерен в обрабатываемый материал (1), количества зерен, находящихся в контакте с обрабатываемой поверхностью (3), математического ожидания относительных высот максимумов (2), радиуса средней приведенной кривизны вершин (4).

Адекватность разработанных теоретических моделей подтверждена экспериментальными исследованиями температуры при обработке образцов из сплава В95пчТ2.

Для удобства применения разработанных теоретических математических моделей силового взаимодействия, производительности процесса, достижимой шероховатости обработанной поверхности по параметру Ra , температуры в зоне обработки в практических целях, разработаны упрощенные зависимости, которые приведены в приложениях диссертационной работы.

Одним из показателей качества обработанной поверхности являются **остаточные напряжения**. Остаточные напряжения, возникающие в поверхностном слое деталей после механической обработки, оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей.

В основе *теоретического определения остаточных напряжений*, возникающих после обработки эластичными полимерно-абразивными кругами, лежит известная в теории пластичности теорема о разгрузке. В соответствии с этой теоремой, 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.

Остаточные напряжения формируются под действием силового и температурного факторов.

При силовом воздействии в процессе резания материал упрочняется, напряжения и деформации материала принимаются в виде степенной зависимости:

$$\sigma_i = m_T \cdot \varepsilon_i^{n_d}, \quad (11)$$

где σ_i – интенсивность напряжения, ε_i – интенсивность относительной деформации; n_d – показатель деформационного упрочнения материала (определен экспериментально), при этом учтено влияние температуры на механические свойства 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.

Уравнение (11) для расчета радиальных напряжений при $n_d < 0,5$ принимает вид:

$$\sigma_i = -C_1 \frac{P_z}{r \cdot B} ch(C_3 \cdot \theta + C_2),$$

где r – расстояние в полярной системе координат от начала координат до точки, в которой определяется напряжение; θ – угол действия силы резания; B – ширина обрабатываемой поверхности; C_2 – коэффициент, определяемый из выражения:

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} ch^{n_d}(C_3 \cdot \theta + C_2) \cdot \sin \theta \cdot d\theta}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} ch^{n_d}(C_3 \cdot \theta + C_2) \cdot \cos \theta \cdot d\theta}; \quad (12)$$

$$C_1 \text{ – коэффициент, определяемый из выражения: } C_1 = \frac{1}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} ch^{n_d}(C_3 \cdot \theta + C_2) \cdot \sin \theta \cdot d\theta}; \quad (13)$$

$$C_3 \text{ – коэффициент, определяемый из выражения: } C_3 = \frac{\sqrt{1-2n_d}}{n_d}. \quad (14)$$

Коэффициент C_2 в уравнении (12) определяется численным методом.

Аналогичное решение проведено также при $n_d > 0,5$.

При температурном воздействии, связь интенсивностей напряжения и деформации можно представить так же, как и от внешней силовой нагрузки:

$$\sigma_{it} = E \cdot \varepsilon_{it}, \quad \text{при } \varepsilon_{it} < \varepsilon_T; \quad \sigma_{it} = m_T \cdot \varepsilon_{it}^{n_d}, \quad \text{при } \varepsilon_{it} \geq \varepsilon_T,$$

где E – модуль упругости; σ_{it} и ε_{it} – интенсивности температурного напряжения и деформации, ε_T – деформация, соответствующая пределу текучести.

Максимальная интенсивность температурной деформации по оси Y равна:

$$\varepsilon_{it} = 2\alpha_0 \cdot \Theta_y,$$

где α_0 – коэффициент линейного расширения материала; Θ – распределение температуры по оси Y .

Установлено, что напряжение по оси Z равно: $\sigma_z = -\sigma_i$.

Таким образом, тангенциальное напряжение σ_z при нагружении имеет один и тот же знак 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.

В зависимости от того, являются ли деформации термоупругими ($\varepsilon_i < \varepsilon_T$) или нет ($\varepsilon_i \geq \varepsilon_T$):

$$P_{z\Sigma}^e = P_{z \max} + P_t^e, \quad \text{при } \varepsilon_i < \varepsilon_T; \quad P_{z\Sigma} = P_{z \max} + P_t, \quad \text{при } \varepsilon_i \geq \varepsilon_T,$$

где P_t^e и P_t – определенные аналитически фиктивные температурные силы, которые определяются по формулам:

$$P_t^e = \frac{\pi \cdot r \cdot B \cdot \sigma_t^e}{2 \left(\frac{1}{f_{\text{ш}}} \cdot \cos\theta + \sin\theta \right)}, \quad \text{при } \varepsilon_i < \varepsilon_T; \quad P_t = \frac{r \cdot B \cdot \sigma_t}{c_1 \cdot ch^{n_d}(C_3 \cdot \theta + C_2)}, \quad \text{при } \varepsilon_i \geq \varepsilon_T,$$

где $f_{\text{ш}} = \frac{P_z}{P_y}$; σ_t^e , σ_t – аналитически рассчитанное температурное напряжение в упругом и упруго-пластическом состояниях.

В результате, суммарные декартовы компоненты напряжений от силы резания и температуры определяются по формулам:

$$\sigma_{y\Sigma} = -C_1 \frac{P_{z\Sigma}}{r \cdot B} ch^{n_d}(C_2 \cdot \theta + C_3) \cos^2\theta \quad \text{и} \quad \sigma_{z\Sigma} = -C_1 \frac{P_{z\Sigma}}{r \cdot B} ch^{n_d}(C_2 \cdot \theta + C_3) \sin^2\theta,$$

и для фиктивного упругого состояния:

$$\sigma_{y\Sigma}^e = -\frac{2}{\pi \cdot r \cdot B} \left(\frac{P_{z\Sigma}}{f_{\text{ш}}} \cos\theta + P_{z\Sigma} \sin\theta \right) \cos^2\theta, \quad \text{и} \quad \sigma_{z\Sigma}^e = -\frac{2}{\pi \cdot r \cdot B} \left(\frac{P_{z\Sigma}}{f_{\text{ш}}} \cos\theta + P_{z\Sigma} \sin\theta \right) \sin^2\theta.$$

В результате, остаточные напряжения по осям Y и Z определяются по формулам:

$$\sigma_y^0 = \sigma_{y\Sigma} - \sigma_{y\Sigma}^e, \quad \sigma_z^0 = \sigma_{z\Sigma} - \sigma_{z\Sigma}^e.$$

где $\sigma_{y\Sigma}$, $\sigma_{z\Sigma}$ – определенные аналитически остаточные напряжения декартовых компонент напряжений; $\sigma_{y\Sigma}^e$, $\sigma_{z\Sigma}^e$ – напряжения фиктивного упругого состояния.

По разработанной математической модели произведен расчет остаточных напряжений при варьировании скорости резания V и деформации круга ΔY . Адекватность разработанных теоретических обоснований формирования остаточных напряжений подтверждена экспериментальными данными с применением рентгенографического метода.

В целом следует отметить, что при обработке исследуемыми эластичными полимерно-абразивными кругами образцов из сплава В95ПчТ2, полученных цилиндрическим и торцевым фрезерованием, остаточные напряжения оказываются полностью переформированы в остаточные напряжения сжатия, которые положительно влияют на эксплуатационные свойства деталей.

Износ инструмента является одним из важнейших показателей, определяющих себестоимость выполнения операции зачистки. В настоящей работе износ инструмента определен экспериментально. В качестве показателя износа круга использована величина износа I (мм/мин) за единицу времени, которая рассчитывалась по формуле:

$$I = \frac{G_1 - G_2}{\gamma_k \cdot \pi \cdot D_k \cdot B \cdot T},$$

где γ_k – плотность материала круга в г/мм³; 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; T – время обработки длины образца l , в мин.

Установлена значимость влияния скорости резания V (м/мин), деформации инструмента ΔY (мм), силы резания P_y (Н), температуры в зоне резания Θ (°C) на величину износа инструмента I и получены соответствующие эмпирические математические модели.

Разработана система корректировки деформации щетки ΔY в связи с износом ворсин в процессе обработки и уменьшением ΔY . Определено время между корректировками.

Отмечено, что при обработке сплава В95пчТ2 исследуемыми кругами с повышенными режимами обработки, на обработанной поверхности появляется незначительное потемнение.

Исследования химического состава поверхностного слоя на электронном микроскопе Jeol JIB-Z4500 показали наличие незначительного количества продуктов взаимодействия полимерно-абразивного инструмента и обрабатываемой поверхности. Установлено, что данные частицы легко удаляются при подготовке к анодированию.

В четвертой главе приведены результаты исследований технологического процесса скругления кромок деталей эластичным полимерно-абразивным радиальным инструментом как на легкодоступных прямолинейных, так и на труднодоступных наклонных участках деталей. Данные исследования необходимы для реализации системы управления финишной обработкой эластичными полимерно-абразивными инструментами, поскольку являются подсистемами третьего (теоретическое моделирование сил взаимодействия ворсин эластичных полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой кромкой) и четвертого (математическое моделирование производительности процесса и качества обработки кромок, износа эластичных полимерно-абразивных инструментов на основе экспериментальных данных) уровней.

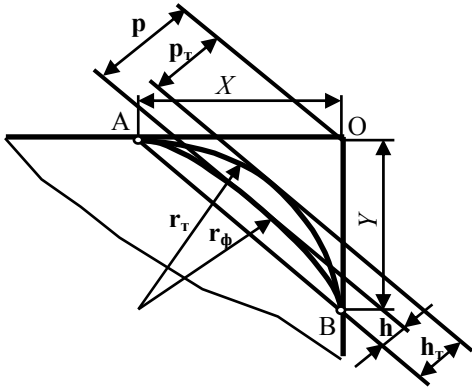


Рисунок 7 – Схема к определению параметров скругления

Эффективность данного способа обработки кромок можно оценить качеством обработанной поверхности и производительностью процесса скругления кромок. Показателями качества, в данном случае, являются:

$$1) \text{ точность месторасположения (позиционирование): } \delta = \frac{X-Y}{Z_k}, \quad (15)$$

где X, Y – координаты перехода конца закругления в прямую линию (рисунок 7); Z_k – средняя величина по осям X и Y ;

$$2) \text{ точность формы радиуса (круглость), определяемая по формуле: } k = \frac{\Delta h}{r_\phi}, \quad (16)$$

где r_ϕ – фактический радиус скругления; Δh – отклонение фактического сегмента от теоретического: $\Delta h = h_T - h$. Здесь $h_T = 0,293 \cdot r_\phi$ – теоретическая высота сегмента; h – фактическая высота сегмента (см. рисунок 7): $h = 0,707 \cdot Z_k + p_T - p$,

где p_T – теоретический размер снятой кромки $p_T = 0,414 \cdot r_T$; p – фактический размер снятой кромки;

3) шероховатость обработанной поверхности.

Производительность процесса обработки оценивается следующими показателями:

$$1) \text{ фактический радиус скругления: } r_\phi = \frac{X^2 + Y^2 + 4h^2}{8h}. \quad (17)$$

$$2) \text{ относительный снятый слой кромки: } \rho = \frac{p}{B_k}, \quad (18)$$

где B_k – ширина инструмента (мм).

$$3) \text{ средняя величина размера кромки по осям X и Y: } Z_k = \frac{X+Y}{2}. \quad (19)$$

Установлено, что эффективными инструментами для скругления кромок на деталях в самолетостроении являются *радиальные полимерно-абразивные щетки*. Для исследований использовались щетки компании 3М различной зернистости марок С ВВ-ZВ с изогнутыми ворсинами и А ВВ-ZВ – с прямыми ворсинами.

Для разработки теоретических положений взаимодействия щетки с обрабатываемой кромкой детали требуется знание ряда характеристик эластичной полимерно-абразивной щетки и материала, из которого она изготовлена.

Плотность материала $\gamma_{ц}$ определена путем взвешивания диска и определением объема вытесненной жидкости при размещении диска в свернутом состоянии в мензурку. Модуль упругости первого рода на изгиб, определялись экспериментально при помощи специально изготовленной установки. Полученные материалы необходимы для аналитического определения сил, действующих в процессе обработки, показателей качества обработанной поверхности и производительности процесса обработки и приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики исследованных радиальных полимерно-абразивных щеток

Марка щетки	Зернистость	E , Н/мм ²	$J_{хср}$, мм ⁴	Плотность $\gamma_{ц}$, г/мм ³	$R_{щ}$, мм	$r_{щ}$, мм	$l_в$, мм	β°
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				

$J_{хср}$ – средний осевой момент инерции по сечениям в точке закрепления и на вершине ворсины, E – модуль упругости первого рода на изгиб, $\gamma_{ц}$ – плотность материала щетки, $R_{щ}$ – радиус щетки; $r_{щ}$ – радиус посадочного отверстия щетки; $l_в$ – длина ворсины, β° – угол наклона ворсины.

Информация о силах взаимодействия ворсин щетки с обрабатываемой кромкой требуется для вычисления целевой функции расхода электроэнергии, необходимой для разработки управляющей подсистемы «Оптимизация параметров операции финишной обработки», а также для определения требуемой мощности металлообрабатывающего оборудования и прогнозирования производительности процесса обработки, формирования поверхностного слоя, температуры в зоне резания, износа инструмента.

Разработана математическая модель силы, возникающей при взаимодействии ворсины щетки с обрабатываемой поверхностью, которая состоит из следующих компонентов:

1. *Центробежная составляющая.* На обрабатываемую кромку действует сосредоточенная центробежная сила $P_{ц}$, перпендикулярная к ворсине, которая определяется по выражению:

$$P_{ц} = \frac{3 \cdot W_{ц} \cdot E \cdot J_{хср}}{l_в^3},$$

где E – экспериментально установленный модуль упругости первого рода при изгибе, Н/мм²;

$J_{хср}$ – средний осевой момент инерции по сечениям в точке закрепления и на вершине ворсины, мм⁴ (вычислен на основе измеренных значений геометрических параметров ворсин приведен в таблице 2); $l_в$ – длина ворсины, мм; $W_{ц}$ – суммарный прогиб ворсины под действием центробежной силы, мм (определен аналитически).

2. *Упругая составляющая силы,* перпендикулярная к ворсине, равна: $P_{уп} = \frac{3 \cdot W \cdot E \cdot J_{хср}}{l_в^3}$, где W – аналитически определенный прогиб ворсины от действия упругой составляющей силы, мм.

3. *Динамическая (ударная) составляющая.* Применительно к удару ворсины по уже закругленной кромке: $P_{уд} = \frac{m_в \cdot V_n}{\tau_{уд}}$, где $m_в$ – масса ворсины, участвующая в ударе (на конце ворсины), кг (определяется аналитически на основе геометрических параметров ворсины для каждого типа исследуемых радиальных щеток); V_n – скорость удара ворсины по обрабатываемой кромке, перпендикулярная к ворсине, м/с; $\tau_{уд}$ – время удара ворсины, с (определено с использованием аналитических решений).

Таким образом, суммарная сила, действующая на обрабатываемую кромку:

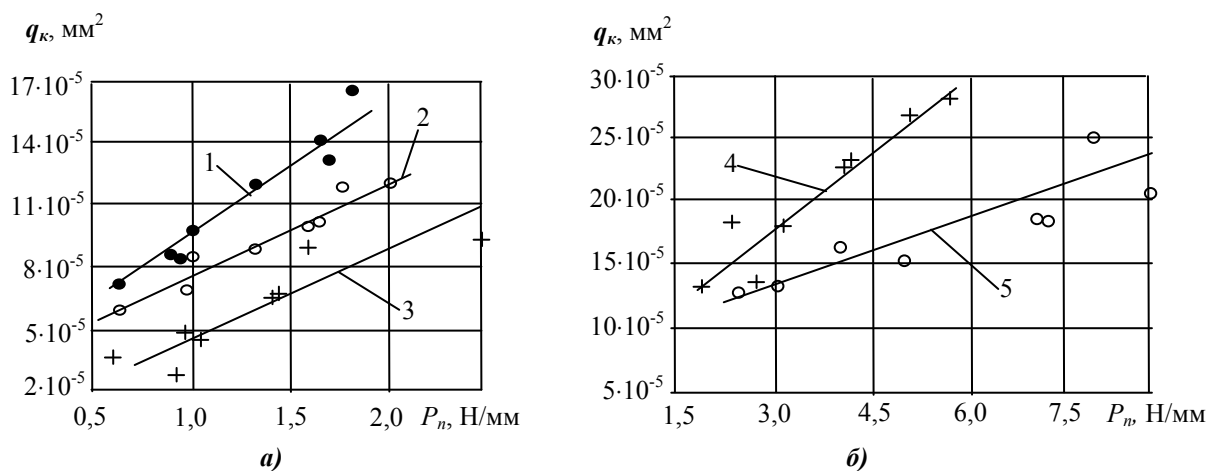
$$P_{сум} = K_д \cdot K_{yn} \cdot (P_{уд} + P_{ц} + P_{yn}),$$

где $K_д$ – количество щеточных дисков в щетке, собранной на оправке (при экспериментальных исследованиях использовалась щетка с 8-ю дисками); K_{yn} – количество ворсин щеточного диска, одновременно действующих на кромку, зависящее от общего количества ворсин в диске и скорости перемещения ворсины по обрабатываемой поверхности.

Адекватность разработанных теоретических положений по определению силового взаимодействия при обработке кромок эластичными полимерно-абразивными щетками подтверждена комплексом экспериментальных исследований на образцах из сплава В95пчТ2.

Экспериментальные исследования **производительности процесса скругления кромок** эластичными полимерно-абразивными щетками в зависимости от деформации щетки ΔY , скорости ее вращения V и подачи S проводились на образцах из В95пчТ2. При этом измерялись размеры X , Y и p (см. рисунок 7). На основании результатов экспериментов и в результате статистической обработки экспериментальных данных, установлена значимость влияния факторов (режимов обработки ΔY , V , S) на исследуемые параметры производительности обработки кромок (17), (18) и получены соответствующие эмпирические математические модели.

Также установлено влияние силы взаимодействия ворсин щетки на производительность процесса скругления и шероховатость поверхности обработанной кромки.



1 – BB-ZB Type C P120; 2 – BB-ZB Type C P220; 3 – BB-ZB Type C P220;
4 – BB-ZB Type A P50; 5 – BB-ZB Type A P36.

Рисунок 8 – Зависимости q_k от силы P_n для щёток

Для установления функциональной связи между производительностью и нормальной составляющей силы резания P_n , предложено в качестве параметра принять q_k – количество материала, снятого при скруглении кромки шириной щетки $B = 1$ мм и подаче $S = 1$ мм/мин.:

$$q_k = \frac{Q_k}{B \cdot S}.$$

На рисунке 8 показаны зависимости параметра производительности q_k от нормальной к ворсинам составляющей силы резания P_n , действующей на 1 мм ширины щетки, при различных значениях режимных параметров обработки – ΔY и V .

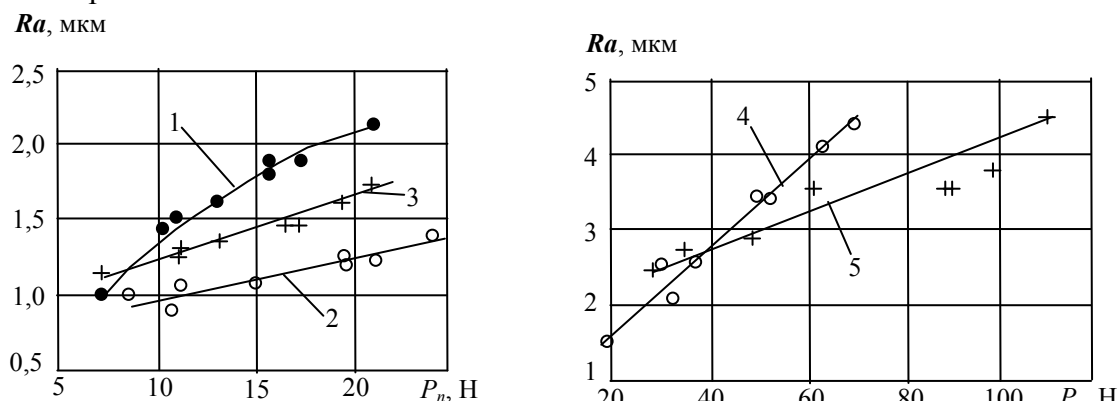
Качество формируемой кромки можно оценить следующими параметрами: точность месторасположения (позиционирование) (15), точность формы радиуса (круглость) (16) и шероховатость обработанной поверхности.

На основании проведенных исследований с использованием типовых представителей щеток с изогнутыми ворсинами (BB-ZB Type C P120) и с прямыми ворсинами (BB-ZB Type A P50), получены математические зависимости параметров, определяемых по формулам (15), (16), а также шероховатости поверхности скругленной кромки от режимных параметров обработки.

По результатам исследований сделан вывод, что использование полимерно-абразивных щеток для скругления кромок обеспечивает все требования по качеству обработанных кромок.

Полученные эмпирические зависимости позволяют определять режимы обработки, при которых обеспечивается требуемая производительность процесса обработки и качество обработанной кромки.

Экспериментальными исследованиями и последующим дисперсионным анализом экспериментальных данных установлена независимость показателя δ от скорости резания V и подачи S , шероховатости Ra от угла наклона α и подачи S , а также показателя k от всех режимов обработки.



1 – BB-ZB Type C P120; 2 – BB-ZB Type C P220; 3 – BB-ZB Type C P220;
4 – BB-ZB Type A P50; 5 – BB-ZB Type A P36.

Рисунок 9 – Зависимость шероховатости Ra от силы P_n для щеток

На рисунке 9 показаны зависимости параметра шероховатости Ra от нормальной к ворсинкам составляющей силы резания P_n , действующей на 1 мм ширины щетки, при различных значениях ΔY и V .

Таким образом, установлено, что по известной силе, полученной теоретически или экспериментально, можно оценить производительность процесса обработки и шероховатость поверхности обработанной кромки.

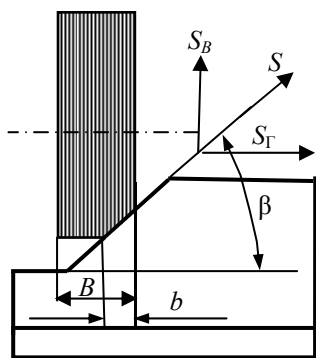


Рисунок 10 – Схема взаимодействия щетки с наклонной кромкой

При обработке длинномерных авиационных деталей возможны случаи, когда необходимо обработать кромку на **наклонной поверхности** без изменения наклона инструмента относительно детали.

На рисунке 10 приведена схема взаимодействия полимерно-абразивной щетки с обрабатываемой кромкой, расположенной под углом β к поверхности стола станка.

При заданной деформации щетки ΔY размер $b = \Delta Y \cdot \text{ctg} \beta$ 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 ΔY 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 $\Delta Y_{\text{ср.}} = 0,5 \Delta Y$).

Если $b > B$, то деформация щетки изменяется от наибольшего значения ΔY до наименьшего $\Delta Y_1 = B \cdot \text{tg} \beta$ при средней $\Delta Y_{\text{ср.}} = 0,5(\Delta Y + \Delta Y_1)$.

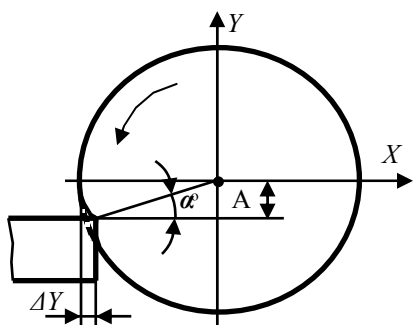


Рисунок 11 – Схема к определению параметров α и ΔY

Для установления закономерностей влияния угла наклона обрабатываемой кромки β на ее формирование проведены эксперименты на образцах из сплавов В95пчТ2 и ВТ20 типовыми представителями щеток компании 3М с изогнутыми ворсинками (BB-ZB-Туре С Р120) и с прямыми ворсинками (BB-ZB-Туре А Р50).

Для оценки интенсивности формирования кромки использовался параметр Z_k , определяемый по (19). Параметром, характеризующим точность месторасположения скругленной кромки (симметричность), принято δ , которое определяется по формуле (15).

Установлено, что для материалов В95пчТ2 и ВТ20 с увеличением угла наклона поверхности β производительность падает как для щетки Type С Р120, так и для Type А Р50. Причина заключается в уменьшении части ширины щетки b , участвующей в работе и уменьшении средней деформации щетки ΔY_{cp} . Также установлено, что с увеличением угла наклона поверхности β отклонение от симметричности δ увеличивается и достигает, например, при $\beta = 60^\circ$ величины $\delta = 1,452$, что недопустимо. Поэтому, при обработке наклонных кромок необходима корректировка положения щетки относительно обрабатываемой кромки – угла α (рисунок 11).

Значимость (незначимость) влияния варьируемых факторов (режимных параметров обработки) на исследуемые параметры (δ , Z_k) установлена при помощи экспериментальных исследований с последующим дисперсионным анализом экспериментальных данных.

В результате проведенного комплекса экспериментальных исследований построены эмпирические математические модели, описывающие взаимосвязи параметров δ и Z_k от всех режимных параметров обработки (скорости резания V , деформации инструмента ΔY , подачи S , углов α и β).

Также, по результатам данных исследований разработаны технологические рекомендации, которые позволяют определять режимы обработки, обеспечивающие получение кромок требуемого размера и качества при углах наклона $\beta = 0 - 60^\circ$.

Износ радиальных полимерно-абразивных щеток при обработке кромок исследовался экспериментально. Величина износа определялась взвешиванием щеток до и после обработки.

В результате экспериментальных исследований и последующих дисперсионного и регрессионного анализа экспериментальных данных, получены зависимости интенсивности износа ворсин в единицу времени I (мг/мин) радиальных щеток ВВ-ZВ Type С Р120, ВВ-ZВ Type С Р220, ВВ-ZВ Type С Р400 и ВВ-ZВ Type А Р36, ВВ-ZВ Type А Р50 от скорости резания V , м/мин и деформации инструмента ΔY , мм.

Разработана система корректировки деформации щетки ΔY в связи с износом ворсин в процессе обработки и уменьшением ΔY . Определено время между корректировками.

Также в рамках настоящей работы проведены исследования скругления острых кромок эластичными полимерно-абразивными кругами. Получены закономерности влияния режимных параметров обработки на производительность процесса обработки и качество скругленных кромок. Получены соответствующие эмпирические математические модели.

В пятой главе описана реализация системы управления финишной обработкой 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.

Торцевые полимерно-абразивные щетки могут эффективно применяться как для **скругления кромок**, так и для **зачистки плоских поверхностей** в труднодоступных для радиальных щеток местах. Исследования проведены с использованием торцевых щеток компании 3М: Scotch-Brite™ Bristle ВD-ZВ, различной зернистости.

Разработана **математическая модель силового взаимодействия** ворсин торцевой щетки с обрабатываемой кромкой с использованием аналитических решений.

На обрабатываемую кромку действуют силы P_x , P_y и P_z , показанные на рисунке 12.

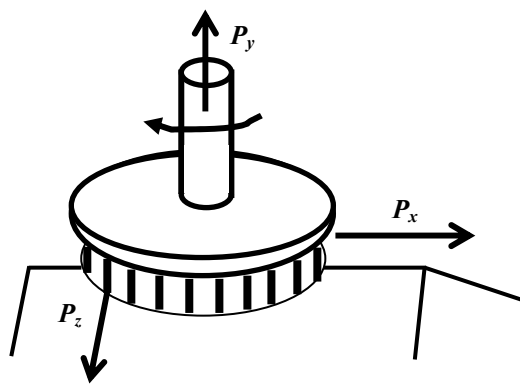


Рисунок 12 – Схема действующих сил

При взаимодействии ворсины с обрабатываемой кромкой каждая из сил P_x , P_y и P_z состоит из упругой и ударной составляющих.

При обработке кромки, расположенной по оси торцевой щетки, *упругая составляющая силы*:

$$\text{По оси Z: } P_{z\text{yn}} = \frac{3 \cdot E \cdot J_{\text{yn.ср}} \cdot N_B}{l_6^3} \cdot (W_{z1} + W_{z2}) \cdot \left(1 + \frac{S}{\pi \cdot n \cdot d_{\text{щ}}}\right), \quad (20)$$

где W_{z1} и W_{z2} – упругая деформация ворсин 1-го и 2-го рядов определена аналитически мм; E – модуль упругости первого рода материала щеток (Н/мм^2), определен при помощи специально изготовленной установки; N_B – количество ворсин в одном ряду; $J_{\text{yn.ср}}$ – средний момент инерции (мм^4), определен аналитически; n – частота вращения щетки, об/мин; S – продольная подача, мм/мин; $d_{\text{щ}}$ – диаметр щетки, мм; l_6 – длина ворсины, мм.

$$\text{По оси X: } P_{x\text{yn}} = \frac{3 \cdot E \cdot J_{\text{yn.ср}}}{l_6^3} (W_{x1} + W_{x2}) \cdot N_B, \quad (21)$$

где $W_{x1,2}$ – упругая деформация ворсин 1-го и 2-го рядов в направлении оси X, мм.

По оси Y:

$$P_{y\text{yn}} = \frac{3 \cdot E \cdot J_{\text{yn.ср}} \cdot N_B}{2 \cdot l_6} \cdot \left[\frac{1}{W_{z1}} + \frac{1}{W_{z2}} + \left(\frac{S \cdot W_{z1}}{\pi \cdot n \cdot d_{\text{щ}}} \right)^2 + \left(\frac{S \cdot W_{z2}}{\pi \cdot n \cdot d_{\text{щ}}} \right)^2 \right]. \quad (22)$$

Ударная составляющая силы:

$$\text{По оси Z: } P_{z\text{yд}} = m_B \cdot N_B \cdot \left(\frac{V_{z1}}{\tau_1} + \frac{V_{z2}}{\tau_2} \right), \quad (23)$$

где m_B – масса ворсины, участвующая в ударе (на конце ворсины), кг; V_{z1} , V_{z2} – скорость удара ворсин 1-го и 2-го рядов по кромке, м/с; τ_1 – время удара ворсин 1-го и 2-го рядов по кромке, с.

$$\text{По оси X: } P_{x\text{yд}} = m_B \cdot N_B \cdot \left(\frac{V_{x1}}{\tau_1} + \frac{V_{x2}}{\tau_2} \right), \quad (24)$$

где V_{x1} , V_{x2} – скорость удара ворсин 1-го и 2-го рядов по кромке в направлении оси X, м/с.

$$\text{По оси Y: } P_{y\text{yд}} = m_B \cdot N_B \cdot \left(\frac{V_{y1}}{\tau_1} + \frac{V_{y2}}{\tau_2} \right), \quad (25)$$

где V_{y1} , V_{y2} – вертикальная составляющая скорости движения ворсин 1-го и 2-го рядов, м/с.

Таким образом, силы, действующие по осям X, Y и Z равны:

$$P_z = P_{z\text{yn}} + P_{z\text{yд}}; \quad P_x = P_{x\text{yn}} + P_{x\text{yд}}; \quad P_y = P_{y\text{yn}} + P_{y\text{yд}}.$$

Следует отметить, что все составляющие формул (20–25) определены аналитически на основе проведенных исследований и полученных знаний о механических свойствах полимерно-абразивного материала и размеров ворсин щетки. Аналогичные формулы получены и для случая обработки кромки, расположенной со смещением относительно оси торцевой щетки.

Адекватность разработанных теоретических математических моделей подтверждена комплексом экспериментальных исследований на образцах из В95пчТ2 и ВТ20.

Для обоснованного выбора инструмента и параметров обработки необходимы знания об их влиянии на процесс формирования обрабатываемой кромки. Обработка кромки производилась по схеме, приведенной на рисунке 12. В качестве параметров **производительности процесса** принят параметр Z_k (19), т.е. среднее арифметическое по измеренным значениям X и Y (см. рисунок 7). 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 измерялись при помощи большого инструментального микроскопа БМИ 1Ц, а в производственных условиях их легко можно измерить с помощью лупы Бринелля.

Экспериментальные исследования проводились на образцах из В95пчТ2 и ВТ20 торцевыми щетками Scotch-Brite™ Bristle BD-ZB различной зернистости.

По результатам экспериментальных исследований получены зависимости параметров производительности Z_k и p от режимных параметров обработки: частоты вращения щетки n , осевой деформации ΔY , подачи вдоль кромки S , смещения по оси щетки A .

На основании полученных экспериментальных данных и после их статистической обработки установлена значимость влияния варьируемых факторов (ΔY , n , S и A) на исследуемые параметры производительности процесса обработки кромки Z_k и p и построены соответствующие эмпирические математические модели.

Качество обработанных торцевыми щетками кромок оценено при помощи параметра δ (15). Результаты экспериментальных исследований доказано, что отклонение месторасположения кромки δ на всех режимах обработки, на которых проводились экспериментальные исследования, не выходит за пределы допустимых.

Шероховатость поверхности скругленных кромок должна соответствовать требованиям чертежа на обрабатываемые детали (например, для большинства деталей самолета шероховатость обработанных поверхностей не должна превышать $Ra 3,2$).

Установлено, что при всех исследованных 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.

Температура, возникающая в зоне контакта полимерно-абразивной торцевой щетки и обрабатываемой кромки, исследована экспериментально. При назначении режимов обработки недопустимо, чтобы температура резания оказалась выше температуры плавления полимерной связки щетки. Экспериментально установлено, что температура при обработке кромок торцевыми полимерно-абразивными щетками на всех диапазонах исследованных режимов не превышает 61°C , что существенно ниже допустимой температуры.

Износ торцевых щеток при обработке кромок исследован по той же методике и том же оборудовании, что и износ радиальных щеток. В результате экспериментальных исследований и последующего дисперсионного и регрессионного анализа экспериментальных данных, установлена значимость влияния варьируемых факторов (режимов обработки) на величину износа I и получены соответствующие зависимости интенсивности износа ворсин торцевых щеток BD-ZB Bristle P50, BD-ZB Bristle P80, BD-ZB Bristle P120 в единицу времени I (мг/мин) от режимных параметров обработки.

Разработана система корректировки деформации щетки ΔY в связи с износом ворсин в процессе обработки и уменьшением ΔY . Определено время между корректировками.

Обработка плоскостей торцевыми полимерно-абразивными щетками. Данный инструмент является незаменимым при обработке участков деталей, недоступных для радиального инструмента. Для исследований использованы торцевые щетки Scotch-Brite™ BD-ZB Ø115 мм компании 3М с зернистостью P50, P80 и P120. Такие щетки состоят из 36-и рядов, в ряде – 15 ворсин, всего 540 ворсин.

Разработана **математическая модель силового взаимодействия** торцевой щетки с обрабатываемой плоскостью с использованием аналитических решений. 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. Действующие силы возникают в результате упругой деформации а также при ударе части ворсин о кромку детали при входе в процесс резания.

Упругая составляющая:

$$\text{По оси } Y: P_{y \text{ уп}} = 3E \cdot J_{Xcp} \cdot N_B \cdot K_y \cdot \frac{1}{2l_g \cdot W_P}, \quad (26)$$

где W_P – полная упругая деформация ворсины (мм), зависящая от деформации щетки ΔY и подачи S (определена аналитически); N_B – количество ворсин, находящихся в контакте; E – модуль упругости первого рода ворсины на изгиб (Н/мм²), определен экспериментально; J_{Xcp} – средний момент инерции для всей ворсины относительно оси X (мм⁴), рассчитан аналитически; l_g – длина ворсины, мм.

$$\text{По оси } Z: P_{z \text{ уп}} = \frac{3 \cdot E \cdot J_{Xcp}}{l_g^3} \cdot N_B \cdot K_z \cdot W_P \cdot \cos \delta_{cp}, \quad (27)$$

где δ_{cp} – средневзвешенный угол между осью Z и направлением деформации ворсины.

$$\text{По оси X: } P_{x_{yn}} = \frac{3 \cdot E \cdot J_{Z_{cp}}}{l_g^3} \cdot N_B \cdot K_x \cdot W_p \cdot \sin \delta_{cp}, \quad (28)$$

где $J_{Z_{cp}}$ – средний момент инерции для всей ворсины относительно оси Z (мм⁴), рассчитан аналитически.

В уравнениях (26), (27), (28) $K_{x, y, z}$ – экспериментально установленный коэффициент взаимного влияния ворсин и скорости их перемещения по поверхности деформации ворсин на процесс взаимодействия с обрабатываемой поверхностью.

Ударная составляющая:

По оси Z: $P_{z_{y\delta}} = 2m_B \cdot N_{B1} \cdot \frac{V_z}{\tau_z}$, где m_B – аналитически рассчитанная масса ворсины, участвующая в ударе (на конце ворсины), кг; N_{B1} – количество ворсин 1-го и 2-го ряда, одновременно действующих на кромку (рассчитано аналитически); V_z – средняя скорость движения ворсины в направлении оси Z, м/с; τ_z – время удара, с.

По оси X: $P_{x_{y\delta}} = 2m_B \cdot N_{B1} \cdot \frac{V_x}{\tau_x}$, где V_x – средняя скорость движения ворсины в направлении оси X, м/с; τ_x – время удара, с.

По оси Y: $P_{y_{y\delta}} = 2m_B \cdot N_{B1} \cdot \frac{V_y}{\tau_y}$, где V_y – средняя скорость движения ворсины в направлении оси Y, м/с; τ_y – время удара, с.

В целом силы, действующие на обрабатываемую кромку, будут равны:

$$P_z = P_{z_{yn}} + P_{z_{y\delta}}; \quad P_x = P_{x_{yn}} + P_{x_{y\delta}}; \quad P_y = P_{y_{yn}} + P_{y_{y\delta}}.$$

Для подтверждения адекватности разработанной теоретической математической модели проведены эксперименты с использованием трех торцевых щеток марок BD-ZB Ø115 мм с зернистостью P50, P80 и P120. Экспериментальные исследования всех составляющих силы резания проведены при обработке плоскостей на образцах из В95пчТ2.

Установлено, что разработанная теоретическая математическая модель сил резания при обработке плоскостей торцевыми полимерно-абразивными щетками адекватно отображает процессы, происходящие в реальных условиях обработки.

Исследование **производительности процесса обработки и качества обработанной поверхности** при обработке плоскостей торцевыми полимерно-абразивными щетками проведено экспериментально и позволит при проектировании технологического процесса обоснованно выбрать режимы обработки для выполнения данной финишной операции.

Были проведены эксперименты по обработке образцов из алюминиевого сплава В95пчТ2 длиной $l = 100$ мм., шириной $B = 20$ мм. В качестве показателя производительности процесса использован относительный съём 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/мм³ – плотность для материала В95пчТ2; T – время обработки в мин.: $T = l/S$;

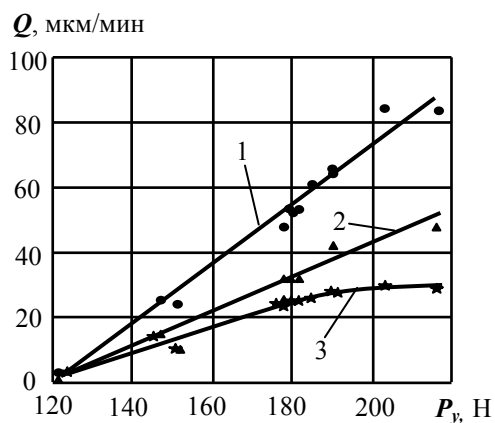
g_1 и g_2 – масса образца до и после обработки соответственно, г (определялась путем взвешивания образцов до и после обработки).

По полученным экспериментальным данным проведен дисперсионный и регрессионный анализ и получены зависимости съема материала (Q) от режимных параметров обработки ($\Delta Y, n, S$).

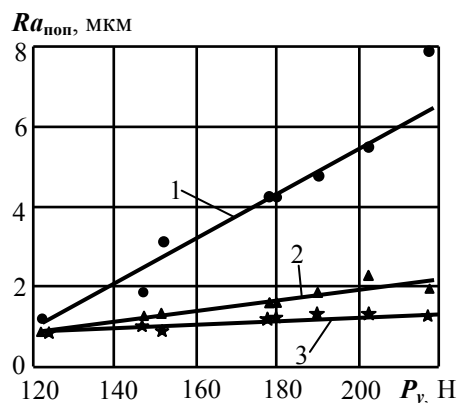
Установлено влияние сил резания на производительность процесса обработки. Эта зависимость хорошо видна на рисунке 13.

По результатам экспериментальных исследований установлено влияние режимов обработки и сил резания на **шероховатость обработанной поверхности по параметру Ra**.

По полученным экспериментальным данным проведен дисперсионный и регрессионный анализ и получены зависимости Ra_{non} от режимов обработки ($\Delta Y, n$).



1 – BD-ZB P50; 2 – BD-ZB P80; 3 – BD-ZB P120
Рисунок 13 – Зависимость съема материала Q от силы резания P_y для щеток



1 – BD-ZB P50; 2 – BD-ZB P80; 3 – BD-ZB P120
Рисунок 14 – Зависимость поперечной шероховатости Ra от силы резания P_y для щеток

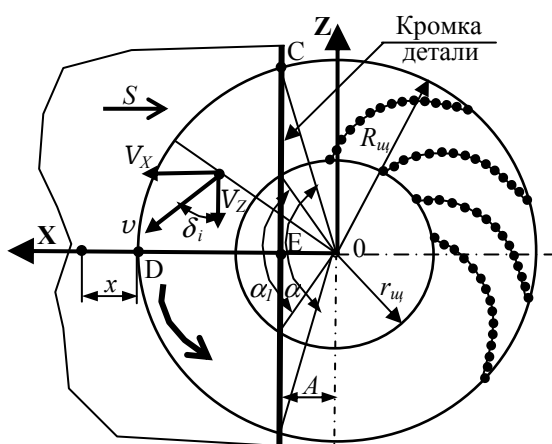


Рисунок 15 – Схема к определению средневзвешенного угла между осью Z и направлением скорости

На рисунке 14 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.

Полимерно-абразивные торцевые щетки, связкой которых является полимер, также как и радиальные полимерно-абразивные инструменты, 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.

Общая тепловая мощность процесса Q_M (Вт) возникает вследствие преобразования механической работы в теплоту, т.е.:

$$Q_M = P_x \cdot V_x + P_y \cdot V_y + P_z \cdot V_z, \quad (29)$$

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.

Математическая модель температуры в зоне контакта торцевой щетки с обрабатываемой плоскостью получена аналитическим путем с использованием известного метода источников:

$$\Theta(x, \infty) = \frac{q_{\text{ист}}}{2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\beta}} \exp \left[-x \cdot \sqrt{\frac{\beta}{\omega}} \right], \quad (30)$$

где $\Theta(x, \infty)$ – температура точки тела с координатами x , ∞ , возникающая при воздействии источника тепла, °С; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого тела, Вт/(м·°С); ω – коэффициент температуропроводности тела, в котором движется источник, м²/с;

$$\beta = \frac{2 \cdot a \cdot pr}{c \gamma_p \cdot F_k}, \quad (31)$$

здесь a – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); pr – периметр фигуры поверхности касания щетки с обрабатываемой деталью, м; $c \gamma_p$ – коэффициент объемной теплоемкости (c – удельная массовая теплоемкость, γ_p – плотность), Дж/(м³·°С); x – расстояние от края источника тепловой энергии до точки, в которой определяется температура, м; F_k – площадь касания щетки с обрабатываемой деталью, м².

В формуле (30) $q_{\text{ист}}$ – интенсивность теплоты, внесенной плоским неподвижным непрерывно действующим источником (Вт/м²), определяемая по формуле: $q_{\text{ист}} = \frac{Q_M}{F_k}$.

Скорость движения источника тепловой энергии в (29) зависит от положения кромки детали относительно оси щетки (размер A на рисунке 15). 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:

$$V_x = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + r_{щ}) \cdot \sin \delta_{cp}, \quad V_y = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + r_{щ}), \quad V_z = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + r_{щ}) \cdot \cos \delta_{cp}. \quad (32)$$

При $A \geq r_{щ}$ средняя скорость будет равна:

$$V_x = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + A) \cdot \sin \delta_{cp}, \quad V_y = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + A), \quad V_z = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (R_{щ} + A) \cdot \cos \delta_{cp}. \quad (33)$$

В уравнениях (32) и (33) δ_{cp} – средневзвешенный угол между осью Z и направлением скорости движения V источника тепловой энергии.

Для подтверждения адекватности предложенной теоретической математической модели возникновения температуры в зоне резания при обработке торцевыми полимерно-абразивными щетками, проведены экспериментальные исследования температуры при $x = 0$.

Износ торцевых щеток при обработке плоскостей исследован по той же методике и том же оборудовании, что и износ радиальных щеток. В результате экспериментальных исследований получены соответствующие зависимости интенсивности износа ворсин исследуемых торцевых щеток в единицу времени I (мг/мин) от режимных параметров обработки.

Разработана система корректировки деформации щетки ΔY в связи с износом ворсин в процессе обработки и уменьшением ΔY . Определено время между корректировками.

Для удобства применения разработанных теоретических математических моделей (силового взаимодействия ворсин торцевых полимерно-абразивных щеток с обрабатываемой кромкой и плоскостью, а также температуры в зоне обработки при зачистке плоскостей) в практических целях, разработаны упрощенные зависимости, которые приведены в приложениях диссертационной работы.

В шестой главе приведены результаты экспериментальных исследований скругления острых кромок на образцах из В95пчТ2 и титанового сплава ВТ20, в которых представлены возможные сочетания поверхностей, встречающихся на деталях в том числе на длинномерных типа профилей. Эксперименты были проведены с помощью робототехнического комплекса на базе промышленного робота KUKA KR 210 R2700 EXTRA, оснащенного электрошпинделем Elettromeccanica Giordano Colombo RC90. Эксперименты проводились на обучающем режиме программирования процесса обработки. Данные исследования необходимы в связи с тем, что обработка поверхностей и кромок на роботах имеет специфические особенности, связанные с низкой жесткостью крепления шпинделя по сравнению с обычными металлорежущими станками и возможностью появления колебательных явлений при обработке.

По результатам экспериментальных исследований оценена производительность процесса обработки по параметру Z_k (19), качество обработанной кромки по параметру δ (15), шероховатость поверхности кромки по параметру Ra . В результате статистической обработки экспериментальных данных получены эмпирические математические модели, описывающие взаимосвязи данных параметров производительности и качества от режимов обработки.

Также, по результатам проведенного комплекса исследований, предложен ряд технологий обработки труднодоступных участков деталей. Труднодоступным местом является, например, кромка в узком па-

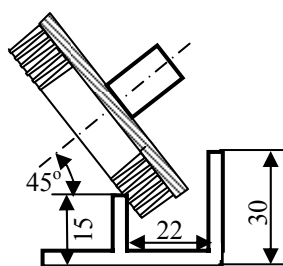


Рисунок 16 – Схема обработки труднодоступной прямой кромки

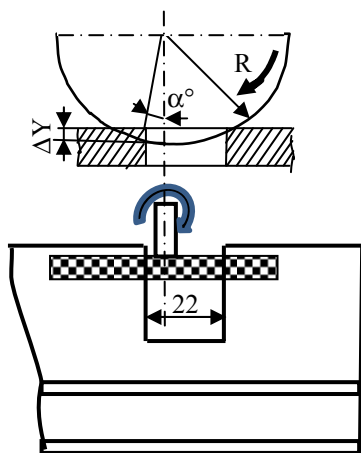


Рисунок 17 – Схема обработки узкого паза радиальной щеткой

зу. Применение торцевой полимерно-абразивной щетки позволит успешно выполнить данную операцию (рисунок 16).

Обработка узкого паза ($B = 22$ мм) возможна при помощи исследованной радиальной щеткой марки ВВ-ZB А Р50 $\varnothing 150$ мм (рисунок 17). Для данного паза при $\alpha = 0^\circ$ допустимая деформация щетки ΔY равна 3,3 мм, что вполне приемлемо.

Также, по результатам проведенных исследований обработки кромок радиальными и торцевыми полимерно-абразивными щетками, разработана конструкция установки (станка с ЧПУ), предназначенной для скругления острых кромок двумя одновременно работающими полимерно-абразивными щетками на длинномерных авиационных деталях из сплавов алюминия длиной до 10000 мм шириной и высотой до 200 мм.

В седьмой главе приведено описание алгоритма проектирования операции обработки деталей в соответствии с представленной в главе 2 *системой оптимального управления проектированием операций финишной обработки полимерно-абразивными инструментами*, а также рассмотрены управляющие подсистемы оптимизации зачистки поверхностей и скругления кромок деталей.

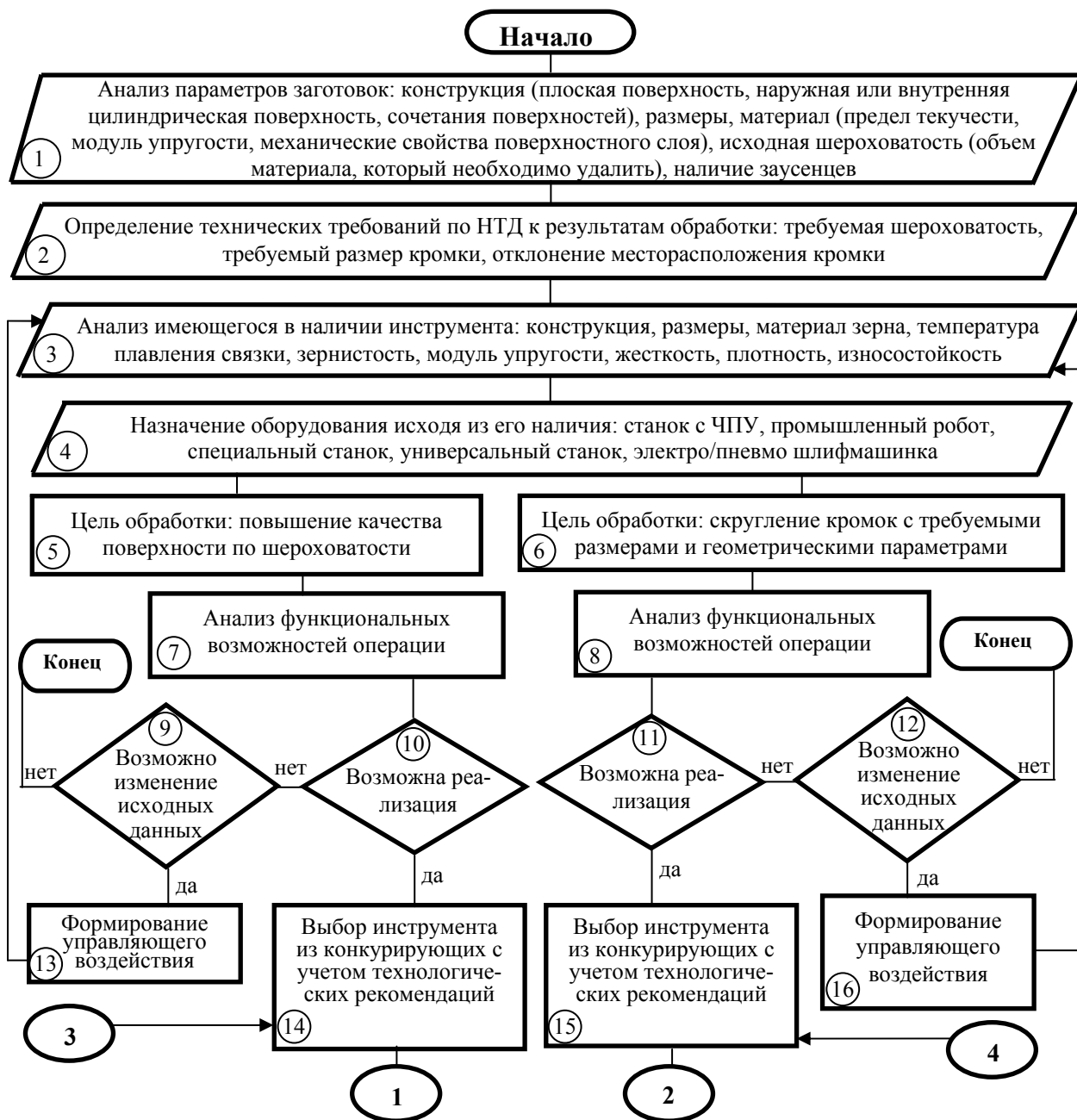


Рисунок 18 – Схема алгоритма проектирования операций финишной обработки эластичными полимерно-абразивными инструментами

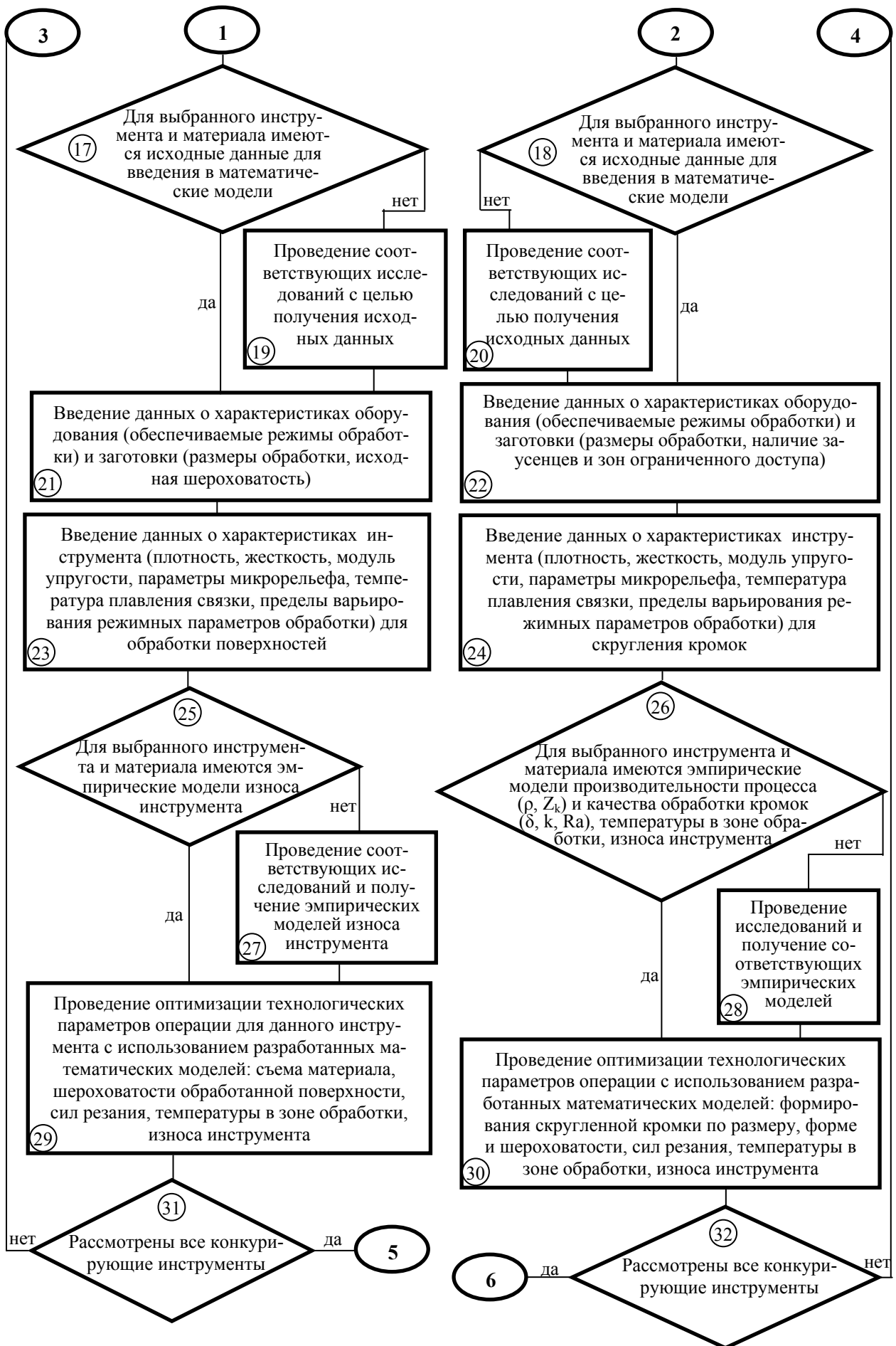


Рисунок 18 – Продолжение
30

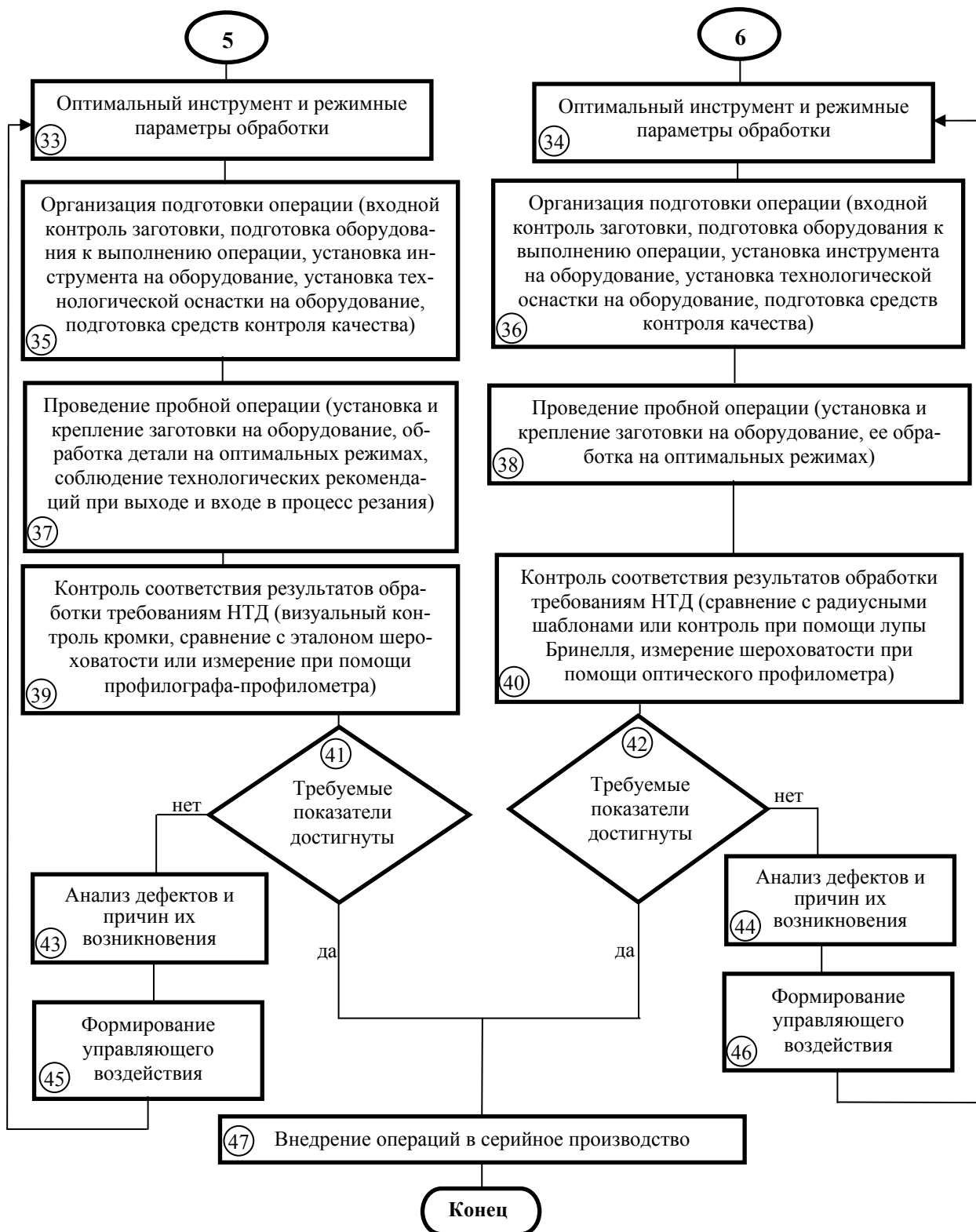


Рисунок 18 – Окончание

Алгоритм проектирования операции финишной обработки деталей эластичными полимерно-абразивными инструментами, разработанный в соответствии с принципами, изложенными в главе 2, представлен на рисунке 18.

Учитывая существенные различия в параметрах производительности и качества при обработке поверхностей и скруглении кромок, в схеме рассмотрены два варианта реализации алгоритма – для поверхностей и для кромок.

Разработанная система проектирования технологической операции финишной обработки деталей эластичными полимерно-абразивными инструментами позволяет назначать наиболее экономически эффективные инструменты и рациональные режимные параметры обработки при обеспечении всех требований нормативно-технической документации к качеству обработки и стабильности процесса при наибольшей производительности и наименьшей себестоимости выполнения операции.

На рисунке 19 в качестве примера приведена структура *управляющей подсистемы оптимизации процесса скругления кромок* (блок 30 на рисунке 18) реализованной на основе рассмотренных в главах 4 и 5 теоретических и эмпирических математических моделей.

В качестве критерия оптимизации выбрана целевая экономическая функция (ЦЭФ), которая рассчитывается для каждого из исследованных инструментов. ЦЭФ предназначена для оценки себестоимости всех вариантов процесса и выбора наиболее экономически выгодных режимных параметров обработки. Критерием выбора оптимального из рассматриваемых инструментов является минимальное значение ЦЭФ.

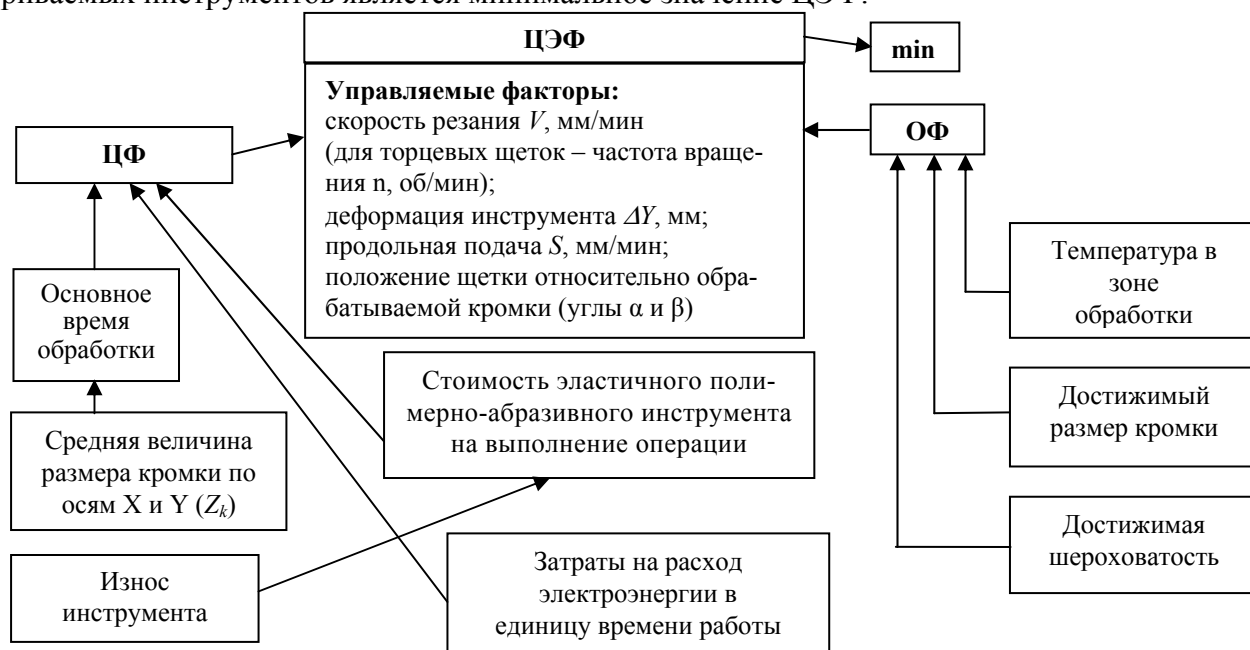


Рисунок 19 – Структура системы оптимизации скругления кромок эластичным полимерно-абразивным инструментом

Целевая экономическая функция (ЦЭФ) рассчитывается по следующей формуле:

$$ЦЭФ = T_{обр} \cdot (C_T + Z_{эл}) + T_B \cdot C_T + C,$$

где $T_{обр}$ – целевая функция (ЦФ) основного времени обработки (зависит от производительности процесса обработки кромки); $Z_{эл}$ – ЦФ затрат на расход электроэнергии в единицу времени работы (непосредственно зависит от мощности привода оборудования и, соответственно, от сил резания, возникающих при обработке кромок); C – ЦФ стоимости эластичного полимерно-абразивного инструмента на выполнение операции (напрямую зависит от износа инструмента); C_T – тарифная ставка рабочего (оператора); T_B – вспомогательное время операции.

Ограничительными функциями (ОФ) являются полученные на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований уравнения достижимой шероховатости, достижимого размера кромки и температуры в зоне резания.

На базе результатов теоретических и экспериментальных данных с помощью программного продукта Borland C++ Builder 6 разработано программное обеспечение для расчета оптимального варианта процесса обработки кромок эластичными полимерно-абразивными инструментами.

По данной программе рассчитаны оптимальные параметры обработки для материалов В95пчТ2 и ВТ20 исследованными полимерно-абразивными инструментами, которые

являются рекомендуемыми при внедрении обработки данными инструментами на производстве.

Аналогичная управляющая подсистема оптимизации разработана и для финишной операции зачистки поверхностей (блок 29 на рисунке 18) и реализована на основе разработанных теоретических и эмпирических математических моделей: производительности процесса обработки, формирования поверхностного слоя по шероховатости, сил резания, износа инструмента, температуры в зоне резания.

В качестве критерия оптимизации также выбрана целевая экономическая функция (ЦЭФ), которая рассчитывается для каждого из исследованных инструментов. Структура системы оптимизации при заданном инструменте имеет вид, аналогичный структуре системы оптимизации скругления кромок, приведенной на рисунке 19.

На базе результатов теоретических и экспериментальных данных с помощью программного продукта Borland C++ Builder 6 разработано программное обеспечение для расчета оптимального варианта процесса зачистки поверхностей эластичными полимерно-абразивными инструментами.

По данной программе рассчитаны оптимальные параметры обработки для материала В95пчТ2 исследованными инструментами, которые являются рекомендуемыми при внедрении обработки эластичными полимерно-абразивными инструментами на производстве. 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).

При обработке поверхностей, припуск на обработку Δ определится по формуле:

$$\Delta = 4 \cdot (Ra^0 - Ra^K),$$

где Ra^0 – исходная шероховатость; Ra^K – требуемая шероховатость.

Учитывая незначительную величину Δ , 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.

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 свой-

ствами 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 инструмента) 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

ми, поскольку включают в себя весь спектр факторов, влияющих на себестоимость выполнения операции при обеспечении 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... 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 ΔY 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 (ΔY) 0,5–2 мм, скорость (V) 200–700 м/мин, подача (S) 42–395 мм/мин; для круга марки FS-WL 2S CRS: деформация (ΔY) 1–3 мм, скорость (V) 250–1000 м/мин, подача (S) 42–395 мм/мин; для круга марки CF-FB 0,5A FIN: деформация (ΔY) 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 м² площади, за счет снижения трудоемкости отделочно-зачистных операций и уменьшения времени простоя помещений).

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии:

1. Подашев, Д.Б. Финишная обработка деталей эластичными полимерно-абразивными инструментами / Д.Б. Подашев. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2018. – 246 с.

Научные статьи в рецензируемых журналах, индексируемых международными реферативными базами данных Web of Science или Scopus:

2. Podashev, D.B. Rounding the sharp edges of machine parts by means of elastic abrasive tools / Yu. V. Dimov, D.B. Podashev // Russian engineering research. – 2013. – vol. 33, №11 – P. 632–638.

3. Dimov Yuriy, Dmitriy Podashev. Optimization of Edge Rounding with Elastic Abrasive Tools // International Journal of Engineering and Technology (IJET). Dec 2015-Jan 2016. – vol. 7, №6. – P. 2001-2007.

4. Podashev, D.B. Edge Forces in Machining by Abrasive Brushes / Yu. V. Dimov, D.B. Podashev // Russian Engineering Research. – 2017. – vol. 37, №2. – P. 117-121.

5. Podashev, D.B. Properties of Elastic Abrasive Wheels / Yu. V. Dimov, D.B. Podashev // Russian Engineering Research. – 2017. – vol. 37, №7. – P. 631-637.

6. Podashev, D.B. Efficient Machining by Elastic Abrasive Wheels / Yu. V. Dimov, D.B. Podashev // Russian Engineering Research. – 2017. – vol. 37, №7. – P. 655-659.

7. 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.

8. 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.

9. Podashev, D.B. Machining forces exerted by an Elastic Abrasive Wheel / Yu. V. Dimov, D.B. Podashev // Russian Engineering Research. – 2018. – vol. 38, №12. – P. 932-937.

Научные статьи в ведущих рецензируемых журналах, включённых ВАК России в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание учёной степени кандидата и доктора наук:

10. Подашев, Д.Б. Оптимизация процесса обработки деталей эластичными абразивными кругами / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // Вестник машиностроения. – 2014. – №8 – С. 65-69.

11. Подашев, Д.Б. Температура в зоне резания при обработке эластичными абразивными кругами / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – №2. – С. 38-42.

12. Подашев, Д.Б. Силы резания при обработке эластичными абразивными кругами / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – №7. – С. 47-55.

13. Подашев, Д.Б. Шероховатость кромок деталей машин при их скруглении / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // Вестник машиностроения. – 2015. – №12. – С.53-55.

14. Подашев, Д.Б. Исследование характеристик полимерно-абразивных щеток / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – №4. – С. 19-24.
15. Подашев, Д.Б. Исследование качества поверхности при скруглении кромок полимерно-абразивными щетками / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – №9. – С. 23-34.
16. Подашев, Д.Б. Расчет силы, действующей на кромку детали при обработке абразивными щетками / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // Вестник машиностроения. – 2016. – №11. – С. 59-63.
17. Подашев, Д.Б. Исследование свойств эластичных абразивных кругов / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // СТИН. – 2017. – №2. – С. 27-32.
18. Подашев, Д.Б. Эффективность обработки эластичными абразивными кругами / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // СТИН. – 2017. – №2. – С. 36-40.
19. Подашев, Д.Б. Исследование производительности процесса скругления кромок полимерно-абразивными щетками / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // Вестник машиностроения. – 2017. – №3. – С. 74-78.
20. Подашев, Д.Б. Производительность при скруглении кромок торцовыми полимерно-абразивными щетками / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – №8. – С. 10-21.
21. Подашев, Д.Б. Силы резания при обработке кромок торцовыми щетками / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – №12. – С. 22-42.
22. Подашев, Д.Б. Шероховатость поверхности при обработке полимерно-абразивными кругами / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – №2. – С. 10-25.
23. Подашев, Д.Б. Силы резания при обработке плоскостей торцевыми полимерно-абразивными щетками / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – №5. – С. 28-45.
24. Подашев, Д.Б. Исследование сил взаимодействия эластичного абразивного круга с обрабатываемой заготовкой / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // Вестник машиностроения. – 2018. – №6. – С. 54-59.
25. Подашев, Д.Б. Математическая модель для определения производительности обработки деталей полимерно-абразивными кругами / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // Вестник машиностроения. – 2018. – №8. – С. 56-63.
26. Подашев, Д.Б. Износ полимерно-абразивных щеток при обработке кромок / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – №11. – С. 43-55.

Авторские свидетельства, патенты, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

27. Пат. 91509 Российская Федерация, МПК А 46 В 3/00. Щетка полимерно-абразивная для механической обработки деталей [Текст] / Димов Ю.В., Подашев Д.Б.; заявитель и патентообладатель Иркутский госуд. техн. университет. - № 2009136118/22(051009); заявл. 29.09.2009; опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5.
28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014613558. Оптимизация финишной обработки деталей эластичным абразивным инструментом / Подашев Д.Б.; заявители и правообладатели ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», ОАО Корпорация «Иркут». – № 2014610836; заявл. 07.02.14; зарег. 28.03.14.
29. Пат. 2561342 Российская Федерация, МПК G01B/5/28. Способ определения параметров режущего микрорельефа эластичного абразивного инструмента [Текст] / Димов Ю.В., Подашев Д.Б.; заявители и правообладатели ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», ОАО Корпорация «Иркут». – № 2014120051/28; заявл. 19.05.14; опубл. 27.08.15, Бюл. №24.
30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018617430. Оптимизация скругления острых кромок деталей эластичными полимерно-абразивными

щетками / Подашев Д.Б.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». – № 2018614648; заявл. 10.05.18; зарег. 25.06.18.

31. Пат. 187637 Российская Федерация, МПК В24В 9/02. Установка для обработки кромок на длинномерных деталях типа профилей [Текст] / Димов Ю.В., Подашев Д.Б., Китов А.К., Чапышев А.П.; заявители и правообладатели ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», ПАО «Научно-производственная корпорация «Иркут». – № 2018113559; заявл. 13.04.18; опубл. 14.03.19, Бюл. №8.

Статьи в других изданиях:

32. Подашев, Д.Б. Эластичный абразивный инструмент для финишной обработки деталей / Д.Б. Подашев, Ю.В. Маркгейм // В Сборнике статей V Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (г. Иркутск). – 16-18 апреля 2015. – С. 117-125.

33. Подашев, Д.Б. Полимерно-абразивные инструменты для финишной обработки деталей / Д.Б. Подашев // В Сборнике статей IX Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири». – г. Иркутск. – 12-15 апреля 2017. – С. 220-225.

34. Подашев, Д.Б. Скругление острых кромок деталей машин полимерно-абразивной щеткой / Д.Б. Подашев // В Сборнике материалов I международной научно-практической конференции «Машины, агрегаты и процессы: проектирование, создание и модернизация». – г. Санкт-Петербург. – 2018. – С. 59-61.

Подписано в печать 14.06.2019. Формат 60 x 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 2,5.
Тираж 100 экз. Зак. 152. Поз. плана 2н.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83