

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ФАЛЕЕВ СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДРОБЕУДАРНОГО
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОБВОДООБРАЗУЮЩИХ ДЕТАЛЕЙ
НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ РЕШЕНИЙ

Специальность 2.5.6. – Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
А.А. Пашков

Иркутск, 2026

Содержание

Введение.....	5
1. Теория и практика дробеударного формообразования обводообразующих деталей сложной формы	14
1.1 Конструктивно-технологические особенности деталей	14
1.2 Технология и оборудование для формообразования крупногабаритных обводообразующих деталей	16
1.3 Теоретические и экспериментальные исследования технологического процесса ДУФ	33
1.4 Постановка целей и задач исследования	47
2. Цифровые решения при моделировании процесса ДУФ	50
2.1 Совершенствование методики конечно-элементного моделирования процесса ДУФ	50
2.2 Определение свойств материала для построения конечно-элементной модели процесса ДУФ	53
2.3 Определение параметров микрорельефа поверхности, обработанной при ДУФ	56
2.4 Формирование базы исходных данных для расчёта эквивалентной нагрузки (ЭН) процесса ДУФ.....	64
2.5 Автоматизация конечно-элементного моделирования процесса множественного внедрения дроби при ДУФ	68
2.6 Конечно-элементное моделирование процесса ДУФ конструктивных элементов деталей с использованием начальных напряжений и деформаций в качестве ЭН	76
Выводы по главе 2.....	81
3. Исследование технологического процесса ДУФ деталей типа оребрённых панелей	83

3.1 Экспериментальное исследование по автоматизированному определению параметров микрорельефа поверхности отпечатками дроби после ДУФ.....	83
3.2 Экспериментальное исследование процесса ДУФ типовых конструктивных элементах деталей.....	87
3.3 Исследование влияния последовательности нагружения при ДУФ.....	93
3.4 Экспериментальное исследование технологического процесса ДУФ на конструктивно-подобных образцах оребрѐнных панелей.....	99
Выводы по 3 главе.....	105
4. Технология, оборудование и программное обеспечение процесса формообразования панелей и обшивок на оборудовании с ЧПУ.....	107
4.1 Структура серийного технологического процесса формообразования панелей и обшивок и применяемое оборудование.....	107
4.2 Методика определения параметров процесса ДУФ.....	121
4.3 Определение геометрических параметров расчѐтных участков деталей, подлежащих ДУФ.....	123
4.4 Методика расчета режимных параметров процесса ДУФ.....	135
4.5 Разработка управляющих программ (УП) процесса ДУФ.....	138
Вводы по главе 4.....	142
Заключение.....	144
Список литературы.....	148
Список сокращений и условных обозначений.....	164
Приложение А.....	166
Приложение Б.....	168
Приложение В.....	172
Приложение Г.....	173
Приложение Д.....	174

Приложение Е.....	179
Приложение Ж.....	185

Введение

Крупногабаритные обводобразующие детали – монолитно-фрезерованные панели и обшивки монолитно-сборных панелей (далее – детали) применяются в конструкции самолётов и ракет, а также в судостроении.

Точность пространственной формы деталей является важнейшим показателем качества выпускаемых изделий. Задача достижения высокой точности формы осложняется конструктивными особенностями деталей – тонкостенностью, наличием подкрепляющих элементов жёсткости, а также малой кривизной, для достижения которой требуется общая деформация, соизмеримая с упругой составляющей.

Для реализации процесса формообразования деталей на отечественных предприятиях применяют, как правило, прессовую гибку в передвижку в ручном режиме управления с последующей доводкой контура детали обдувкой дробью на ручных дробеструйных установках. Недостатками такой технологии являются низкая точность формы деталей при наличии огранки, высокая трудоемкость и зависимость от квалификации исполнителей.

За рубежом основным методом, применяемым при изготовлении деталей, является дробеударное формообразование (ДУФ). Объём информации по промышленной реализации технологии дробеударного формообразования достаточно ограничен. Известно, что изготавливаемые детали должны проектироваться специально под данную технологию. Дробеударная обработка выполняется на автоматизированном оборудовании, позволяющем регулировать поток дроби в пространстве рабочей камеры. Процесс подготовки управляющих программ требует проведения большого объема опытных работ на натуральных образцах. При этом достигаемые показатели точности формы деталей при обработке на автоматизированном оборудовании относительно невысоки. Для достижения требуемой точности применяется доводочная обработка деталей при помощи ручных дробеструйных установок.

Перспективной отечественной разработкой являются комбинированный метод формообразования панелей и обшивок, предусматривающий отдельное образование продольной и поперечной кривизны контура деталей. При этом продольная кривизна образуется упругопластической гибкой обшивок или локальным пластическим деформированием подкрепляющих рёбер панелей, а поперечная – обработкой дробью наружной поверхности деталей, т.е. посредством дробеударного формообразования.

Для реализации операции дробеударного формообразования Иркутским национальным исследовательским техническим университетом (ИРНИТУ) разработан ряд установок с числовым программным управлением (ЧПУ) серии УДФ, принципиальным отличием которых от импортного оборудования является использование рабочих органов контактного типа – дробемётных аппаратов и зачистных головок, при помощи которых реализуется полосовая обработка неподвижной детали. Это позволяет выполнять операционный контроль формы детали непосредственно в процессе обработки и открывает неограниченные возможности по достижению высоких показателей точности.

Актуальность темы исследования

Опыт применения установок серии УДФ при формообразовании деталей с длиной до 15 метров в ручном режиме управления показал их преимущество перед прессовым методом в виде значительного увеличения производительности. Однако, в случае изготовления более крупногабаритных деталей, а также в связи с необходимостью значительного увеличения программ выпуска самолётов становится актуальной задача дальнейшего роста производительности процесса дробеударного формообразования. Данную задачу можно решить путём введения операции предварительного (чернового) дробеударного формообразования, реализуемой на высокопроизводительном оборудовании проходного типа. Подобное оборудование в отечественной практике применяется для поверхностного деформационного упрочнения и позволяет регулировать общую интенсивность потока дроби при перемещении детали через рабочую камеру.

Не менее актуальными являются вопросы промышленной реализации процесса дробеударного формообразования в программном режиме управления, а также снижения трудоёмкости процесса подготовки производства и повышения точности расчёта параметров процесса дробеударного формообразования.

Перечисленные проблемы могут быть решены путём развития технологии дробеударного формообразования на оборудовании с ЧПУ за счёт применения цифровых решений на основе алгоритмов машинного обучения при выполнении технологических расчётов и подготовке управляющих программ.

Степень разработанности темы

Исходя из проведённого анализа можно заключить, что теоретические основы процесса дробеударного формообразования достаточно изучены, а эффективность применения данной технологии подтверждена как зарубежной, так и отечественной практикой, при этом нерешенным остаётся ряд проблем.

Эффективным подходом к решению задач определения формоизменения деталей при дробеударном формообразовании является использование при конечно-элементном моделировании эквивалентной нагрузки, обусловленной обработкой дробью. Данную нагрузку задают в виде температурного расширения поверхностного слоя, распределения предварительно рассчитанных деформаций или сил и т.д. При этом лучшие результаты по точности моделирования достигнуты зарубежными исследователями путём внедрения в поверхностный слой модели детали предварительно определённых начальных напряжений и деформаций. Однако методики определения начальных напряжений с учётом реального микрорельефа зоны обработки и фракционного состава дроби весьма трудоёмки и требуют больших вычислительных ресурсов. Такие же недостатки характерны для моделирования формоизменения реальных крупногабаритных деталей при дробеударном формообразовании и определения режимных параметров данного процесса.

Реализация серийной технологии дробеударного формообразования с разработкой оборудования проходного типа на основе зарубежных решений,

нерациональна в связи с высокой сложностью подготовки производства и невозможностью достижения требуемой точности формы деталей без дробеструйной доводки с помещением деталей на контрольный стенд.

Отечественные установки для дробеударного формообразования контактного типа позволяют достичь высокой точности, но их производительность при изготовлении крупногабаритных деталей недостаточна. Программное обеспечение для подготовки управляющих программ для данного оборудования, пригодное для промышленного применения на сегодняшний день отсутствует.

Исходя из вышеизложенного, была сформулирована цель диссертационной работы: *повышение эффективности производства обводообразующих деталей типа панелей и обшивок на основе совершенствования структуры технологического процесса и создания методик автоматизированного расчёта параметров дробеударного формообразования на оборудовании с ЧПУ.*

Задачи исследования:

1. Разработка методики и специального программного обеспечения с использованием алгоритмов машинного обучения для определения эквивалентной нагрузки, вызывающей формоизменение деталей при дробеударном формообразовании, в виде эпюры начальных напряжений и деформаций в поверхностном слое с учётом реальных свойств материала, фракционного состава дробы и микрорельефа обработанной поверхности.

2. Разработка высокопроизводительных способов автоматизированного определения фракционного состава дробы, применяемой при дробеударном формообразовании, и диаметров отпечатков, образующихся на обработанной поверхности, с применением машинного зрения и алгоритмов машинного обучения.

3. Разработка методики конечно-элементного моделирования процесса дробеударного формообразования расчётных участков в виде типовых конструктивных элементов деталей, обеспечивающей повышение адекватности

расчёта за счёт использования в качестве эквивалентной нагрузки эпюр начальных напряжений и деформаций в поверхностном слое, связанных с режимными параметрами процесса обработки дробью.

4. Разработка методики и программного обеспечения для назначения режимных параметров процесса дробеударного формообразования на оборудовании контактного и проходного типов на основе предварительно сформированной базы данных зависимостей кривизны расчётных участков деталей от величины эквивалентной нагрузки в виде эпюр начальных напряжений и деформаций в поверхностном слое.

5. Разработка методики и программного обеспечения для автоматизированного анализа геометрических параметров детали по её CAD модели с разбивкой детали на расчётные участки для дальнейшего назначения режимов процесса дробеударного формообразования и маршрутов обработки.

6. Разработка структуры технологического процесса автоматизированного формообразования крупногабаритных обводообразующих деталей типа панелей и обшивок с применением дробеударного оборудования проходного типа для черновой формообразующей обработки и оборудования контактного типа для доводочного дробеударного формообразования.

7. Проведение экспериментальных исследований по проверке адекватности результатов моделирования процесса дробеударного формообразования на конструктивно-подобных образцах деталей.

Научная новизна работы:

1. Предложена методика автоматизированного определения параметров микрорельефа обработанной поверхности в виде фракционного состава отпечатков на основе анализа объёмных изображений обработанной поверхности, полученных с применением 3D-оптического профилометра, с применением машинного зрения и алгоритмов машинного обучения (п. 3 паспорта специальности 2.5.6).

2. Предложена методика и выполнено конечно-элементное моделирование процесса множественного внедрения сферической дроби в

закреплённую пластину из материала детали для получения эпюр начальных напряжений и деформаций с автоматической подготовкой расчетного файла со случайной генерацией координат и скоростей соударения на основе определённых параметров микрорельефа обработанной поверхности (п. 3 паспорта специальности 2.5.6).

3. Предложена методика конечно-элементного моделирования процесса дробеударного формообразования расчетных участков в виде типовых конструктивных элементов деталей с использованием в качестве эквивалентной нагрузки эпюр начальных напряжений и деформаций в поверхностном слое детали, связанных с режимными параметрами процесса обработки дробью (п. 3 паспорта специальности 2.5.6).

4. Созданы алгоритмы с использованием машинного обучения на основе базы данных зависимостей кривизны расчетных участков деталей типа панелей и обшивок от начального напряженно-деформированного состояния для назначения режимных параметров процесса дробеударного формообразования с применением оборудования проходного типа для черновой формообразующей обработки и оборудования контактного типа для доводочной обработки (п. 2-3 паспорта специальности 2.5.6).

Теоретическая и практическая значимость

1. Разработана математическая модель процесса формирования начального напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя детали, подвергнутой дробеударному формообразованию, с учетом случайного характера диаметра дробинки-индентора, координат отпечатков и скоростей соударения. Данная модель использована для установления зависимости параметров эпюр начальных напряжений и режимов процесса дробеударного формообразования на основе нового подхода, где в качестве эквивалентной нагрузки выступают эпюры начальных напряжений и деформаций в поверхностном слое, с учетом последовательности обработки участков детали.

2. Сформулированы технологические рекомендации для осуществления процесса автоматизированного формообразования крупногабаритных

обводообразующих деталей типа панелей и обшивок с применением дробеударного оборудования проходного типа для черновой формообразующей обработки и оборудования контактного типа для доводочного дробеударного формообразования.

Методология и методы исследования

Работа сформирована на базе научных основ технологии машиностроения. Теоретические исследования выполнены с применением методов математического анализа, теории упругости и пластичности. Для математического моделирования была использована лицензионная многоцелевая программа нелинейного конечно-элементного анализа LS-Dyna, генерация моделей осуществлялась при помощи языка программирования Python. Данные, полученные при моделировании, обрабатывались при помощи инструмента Pandas для анализа и обработки данных. Разработка интерфейса прикладного программирования для программы трехмерного моделирования выполнялось при помощи CAD программы NX12 с использованием модуля NxOpen и языка программирования C#. Разработка программы и интерфейсного модуля по назначению режимов обработки выполнялось в интегрированной среде разработки Visual Studio 2022. Для определения фракционного состава дроби был использован стенд машинного зрения NI SMART CAMERA 1764. Исследование свойств материала выполнялось на испытательной машине ViSS UTM-100 kN.

По результатам проделанных работ автор выносит на защиту:

1. Методику автоматизированного определения параметров микрорельефа поверхности, обработанной при помощи дробеударного формообразования, в виде фракционного состава отпечатков на основе анализа объёмных изображений, полученных с применением 3D-оптического профилометра с применением машинного обучения на основе модели гауссовых смесей (Gaussian Mixture Models) и библиотеки OpenCV компьютерного зрения.
2. Методику и результаты конечно-элементного моделирования процесса множественного внедрения сферической дроби в закреплённую пластину для

получения эпюр начальных напряжений и деформаций с автоматической подготовкой расчетного файла со случайной генерацией координат и скоростей соударения дроби с обрабатываемой поверхностью на основе определённых параметров микрорельефа.

3. Методику конечно-элементного моделирования процесса дробеударного формообразования расчётных участков деталей с использованием в качестве эквивалентной нагрузки эпюр начальных напряжений и деформаций в поверхностном слое, предназначенные для формирования баз данных зависимостей кривизны расчётных участков деталей от параметров начальных напряжений и деформаций, определяемых режимами обработки. Результаты апробации разработанной методики в виде прогнозирования формоизменения образцов-пластин после обработки дробью с определением зависимости изменения кривизны смежных обрабатываемых участков.

4. Программное обеспечение для анализа геометрических параметров детали по САД модели с последующим назначением режимов и траекторий обработки и генерации управляющих программ для оборудования с ЧПУ.

Достоверность подтверждена сходимостью полученных результатов моделирования и экспериментальных исследований. Действительность выводов подтверждается практической реализацией результатов. Экспериментальные результаты получены с использованием современного высокоточного аналитического оборудования: оптического профилометра Bruker Contour GT-K1, стенда машинного зрения NI SMART CAMERA 1764 и универсальной сервогидравлической испытательной машине ViSS UTM-100 kN.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на VIII международной конференции «Проблемы механики современных машин» (г. Улан-Удэ, 2022 г.), XVI международной научно-практической конференции «Современные авиационные технологии. International Conference on Aviation Engineering» (г. Иркутск, 2023 г.), XIII и XV

Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов» (г. Иркутск, 2023 и 2025 гг.).

Результаты работы представлены в 7 публикациях. В журналах, рекомендуемых ВАК перечня опубликовано 3 статьи.

Диссертация подготовлена на кафедре технологии и оборудования машиностроительных производств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ИРНИТУ).

Исследования, представленные в настоящей диссертации выполнены в рамках реализации программы развития ИРНИТУ согласно Программе стратегического академического лидерства Приоритет-2030; входят в состав работ, выполненных по договору №56/22 от 22.08.2022 г. на проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ между ИРНИТУ и АО «Электромеханика» на тему «Разработка комплексной технологии формообразования-упрочнения длинномерных панелей и обшивок», в рамках исполнения договора № 14738 от 18.02.2020 г., заключенного между АО «Электромеханика» и АО «Туполев» на изготовление и поставку автоматизированной линии формообразования, зачистки и упрочнения длинномерных панелей и обшивок.

1. Теория и практика дробеударного формообразования обводообразующих деталей сложной формы

1.1 Конструктивно-технологические особенности деталей

В данной работе рассматриваются обводообразующие детали изделий типа панелей, которые могут быть классифицированы как монолитно-сборные или монолитно-фрезерованные. Монолитно-сборные панели представляют собой конструкции, в которых элементы силового набора, такие как стрингеры, ребра жесткости и стыковочные профили, соединяются с обшивкой с использованием заклепок, болтов или сварки. Габаритные размеры рассматриваемых деталей могут достигать до 30 м в длину и до 3 м в ширину. Заготовки изготавливают фрезерованием на станках с ЧПУ из плит и профилей высокопрочных алюминиевых сплавов, которые обладают повышенной чувствительностью к циклическим нагрузкам и концентрации напряжений. Это обстоятельство обуславливает выбор конструктивных форм, характеризующихся плавными переходами при изменении сечений и минимальными перепадами жесткости.

Типовая конструкция обшивки монолитно-сборной панели представлена на рисунке 1.1а. Обшивки представляют собой детали с гладкой наружной (аэродинамической) поверхностью и внутренним набором, включающим конструктивные элементы, такие как полотно, дорожки для крепления продольных и поперечных элементов каркаса, карманы и люки с окантовками. Толщина обшивок современных самолетов может изменяться от 1,5 мм до 20 мм и более. Монолитно-фрезерованные панели (см. рисунок 1.1б) включают полотно и подкрепляющий каркас в виде ребер. Ребра могут принимать различные формы, включая Т-образную, Г-образную и прямолинейную (см. рисунок 1.2), а также различаться по своему направлению, которое может быть, как продольным, так и поперечным.



a)



б)

а - деталь типа обшивка; б - деталь с подкрепляющим каркасом ребер

Рисунок 1.1 – Типовые монолитно-фрезерованные панели

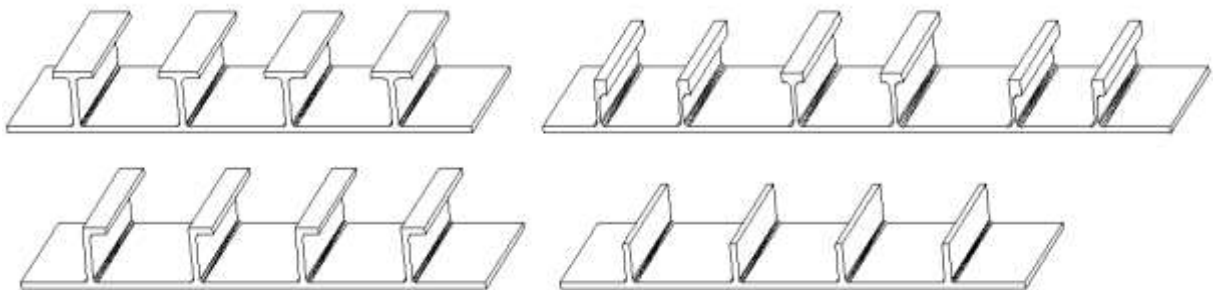


Рисунок 1.2 – Типовые конструктивные решения ребер монолитных панелей

Пространственная форма деталей представляет совокупность поверхностей одинарной, двойной и знакопеременной кривизны. Типовые значения стрелы прогиба по поперечным и продольным сечениям детали обшивки самолёта приведены на рисунке 1.3.

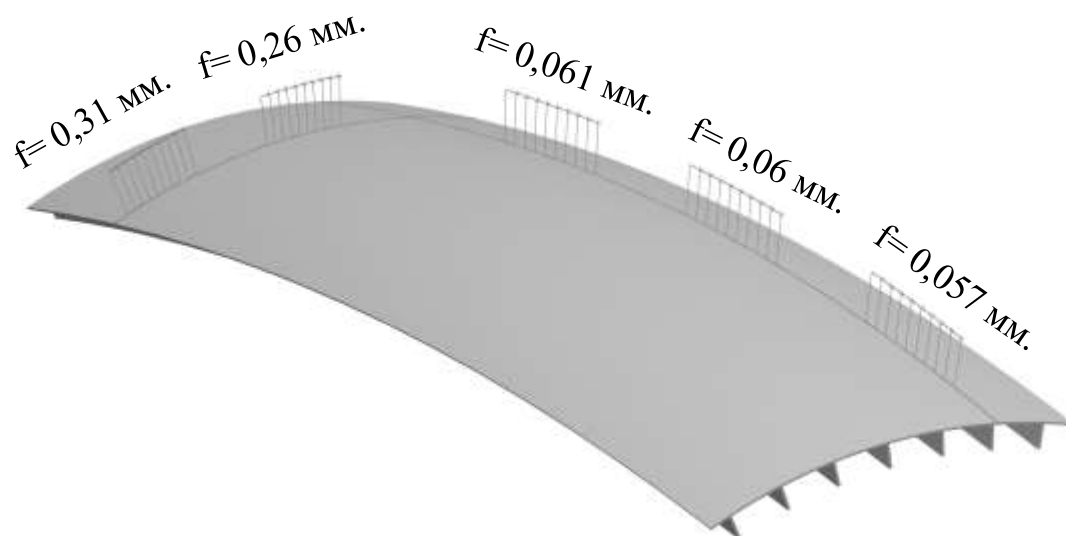


Рисунок 1.3 – Распределение стрел прогиба на базе 200 мм в продольном и поперечном направлении в зонах перегиба верхней панели крыла

1.2 Технология и оборудование для формообразования крупногабаритных обводообразующих деталей

В российской авиационной промышленности формообразование деталей обшивки в основном осуществляется методом прессовой гибки в передвижку с последующей доводкой контура детали, помещённой на контрольный стенд, обдувкой дробью на ручных дробеструйных установках (см. рисунок 1.4).

Наибольшую сложность представляет процесс формообразования участков деталей двойной кривизны. При гибке на прессах используют сопряженные штампы для обшивок и рессорные штампы для панелей с ребрами [77]. Гибка выполняется с большим числом нагружений с постепенным приближением формы детали к заданной.

Недостатками перечисленных технологий являются низкая точность контура деталей при наличии огранки, высокая трудоемкость и зависимость от квалификации исполнителей.



а)



б)

а - Сухой Суперджет 100 гибкой на прессе; б - беспыльная дробеструйная установка для доводки формы детали на контрольном стенде

Рисунок 1.4 – Формообразование обшивки крыла самолёта [67]

Для автоматизации процесса гибки в передвижку имеется автоматизированное оборудование – разработанный Национальным Институтом Авиационных Технологий (НИАТ), специальный правильный пресс СПП-250 (см. рисунок 1.5).

Изгибающее усилие при гибке создается плунжерным гидроцилиндром, соединенным с ползуном пресса. Гибка производится между двумя пуансонами, расположенными попарно на верхнем и нижнем инструментальном блоке. Пуансоны имеют независимое управление и устанавливаются на нужные расстояния в соответствии с условиями деформирования. Для гибки детали в продольном или поперечном направлениях столы с пуансонами могут поворачиваться на угол до 180° (см. рисунок 1.6).



Рисунок 1.5 - Специальный правильный пресс СПП-250

Пресс СПП-250 обеспечивает возможность автоматизации процессов перемещения заготовки и пуансонов, а также выполнение гибки с учётом пружинения детали. Данный пресс может эффективно применяться для гибки деталей одинарной кривизны. На сегодняшний день данная технология находится в стадии освоения [70, 69].

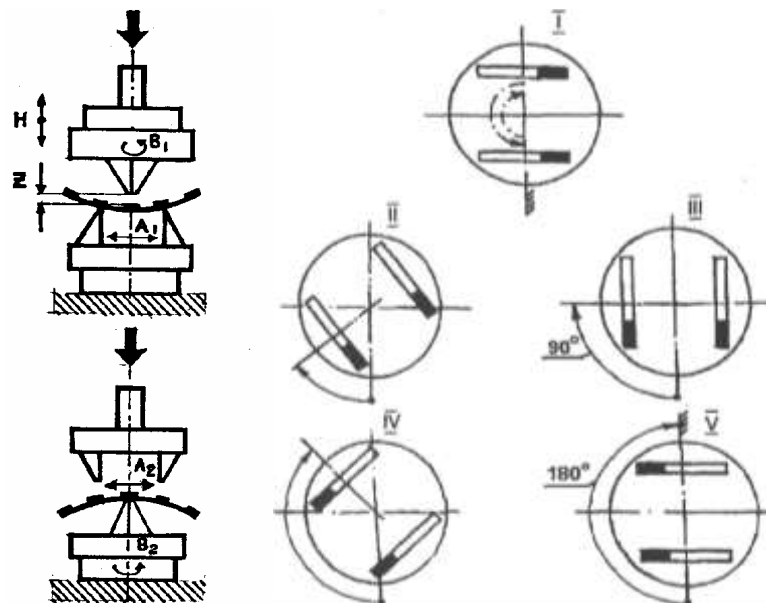


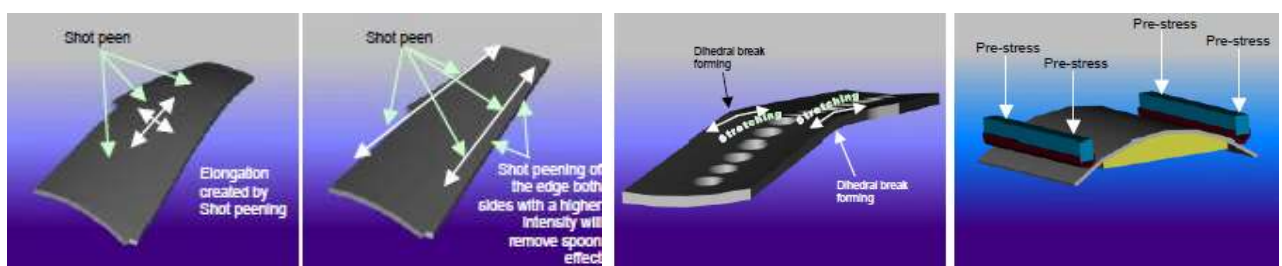
Рисунок 1.6 - Схемы расположения пуансонов прессы СПП-250

Известен способ формообразования монолитных панелей крыла с предварительной гибкой на прессе и последующей термофиксацией – упругим нагружением с нагревом до температуры формообразования и выдержкой при

этой температуре в зафиксированном состоянии для релаксации напряжений и старения материала [49]. В работе [44] приведены карты замеров, изготовленных деталей, с отклонениями контура до 2 мм, из которых следует, что способ не обеспечивает современных требований к точности формы деталей.

За рубежом основным методом, применяемым при изготовлении крупногабаритных обводообразующих деталей самолетов, является дробеударное формообразование (ДУФ). В ряде публикаций и сайтов сети Интернет приводятся схемы технологических решений, применяемых зарубежными компаниями.

Общие сведения об известных зарубежных технологиях приведены в работах [123, 95, 101, 81, 83]. В основе процесса ДУФ лежит двухосное удлинение поверхностных слоев ударами дроби. В результате листовая деталь приобретает поверхность двойной кривизны, которую в отечественной литературе называют «бочкообразной», а в зарубежной – «ложкообразной». Для получения поверхностей заданной формы у деталей типа обшивок применяют такие способы формообразования, как последовательная дробеударная обработка наружной поверхности детали и двухсторонняя обработка по различным схемам, а также заневоливание (предварительный упругий изгиб), которое позволяет увеличить кривизну обработанной дробью детали в направлении изгиба (см. рисунок 1.7).



а)

б)

в)

г)

а - схема формоизменения листовой детали при односторонней дробеобработке;

б - уменьшение (устранение) продольной кривизны детали обработкой продольных кромок;

в - растяжение кромок; г - заневоливание детали при формообразовании зоны перегиба

Рисунок 1.7 – Способы ДУФ деталей типа обшивок, применяемые за

рубежом [123]

Известен патент США [101], в котором описан способ формообразования области перегиба ребристых панелей. Согласно данному патенту, удлинение рёбер осуществляется посредством двусторонней дробеобработки (см. рисунок 1.8).

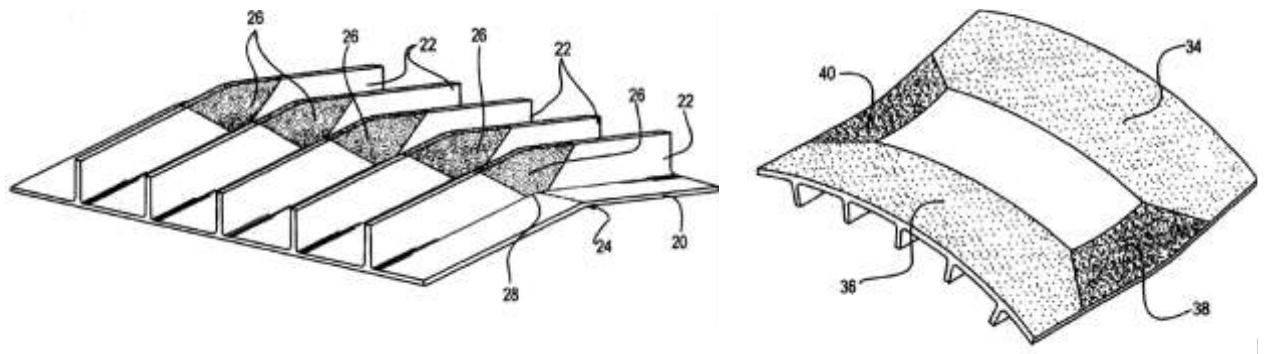
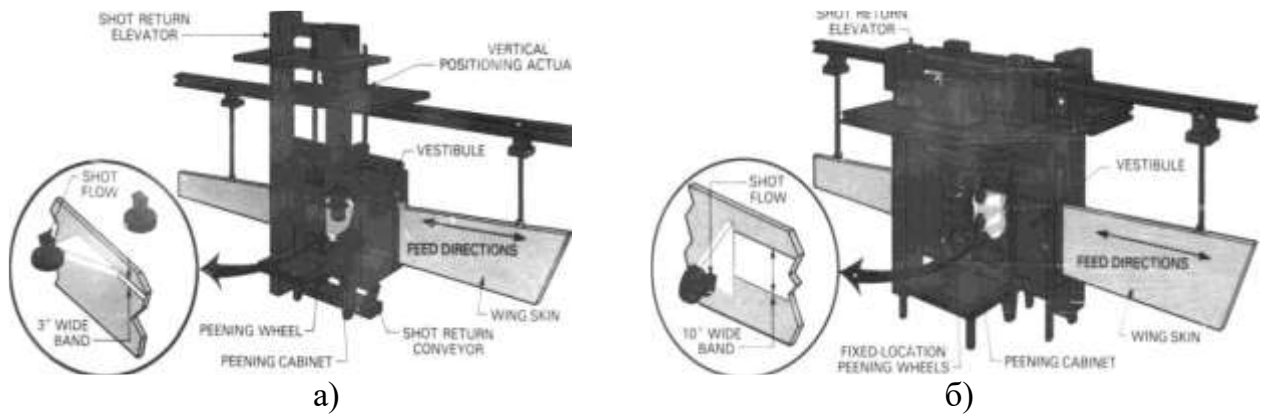


Рисунок 1.8 – Схема способа формообразования ребристых панелей [101]

Для реализации технологии ДУФ за рубежом разработан ряд специальных автоматизированных установок. В работах [47, 48, 131] описана технологическая линия завода Boeing Commercial Airplane Co в г. Auburn для формообразования панелей, разработанная компанией Wheelabrator. Линия включает две установки проходного типа (см. рисунок 1.9). Первая установка (см. рисунок 1.9а) предназначена для получения продольной кривизны двухсторонней обработкой кромок детали дробью диаметром 3,2 мм и оснащена четырьмя подвижными дробемётными аппаратами (ДА) (по два с каждой стороны).

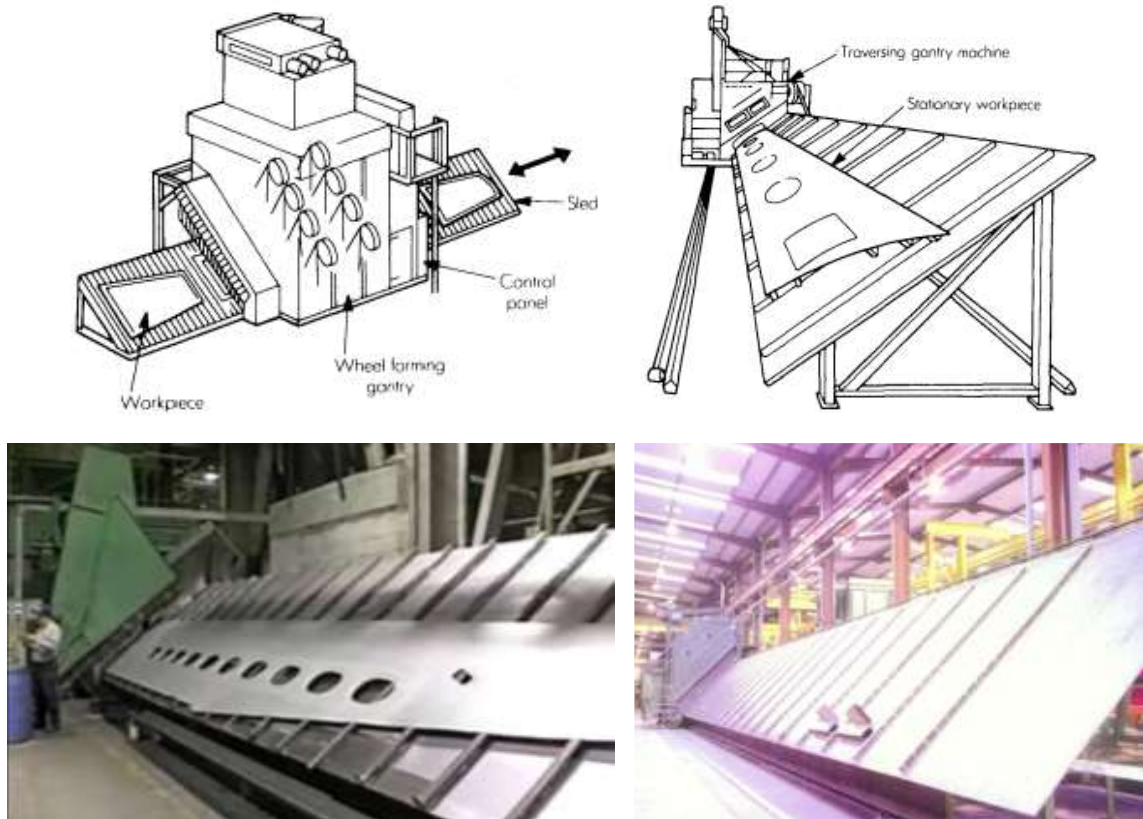


а – одностороннее; б - двухстороннее

Рисунок 1.9 – Оборудование для обработки дробью технологической линии, разработанной компанией Wheelabrator [7]

На второй (см. рисунок 1.9б) выполняется обработка наружной поверхности детали дробью диаметром 1,12 мм с использованием 12 ДА (по 6 с каждой стороны для формообразования панелей левых и правых частей крыла).

В сети Интернет имеются общие сведения о технологии и оборудовании для ДУФ, разработанными компанией Metal Improvement Co. Inc. (MIC), подразделением компании Curtiss-Wright Surface Technologies (CWST) (см. рисунок 1.10). В работе [9] приведены технологические возможности процесса ДУФ и схемы применяемого оборудования в виде порталных дробеструйных и дробемётных машин двух типов: стационарных (см. рисунок 10а) и перемещающихся относительно неподвижной заготовки (см. рисунок 10б). Способ получения деталей с поверхностями сложной формы в известных нам публикациях, связанных с компанией MIC, не раскрывается.



а)

б)

а - стационарного; б - перемещающегося относительно неподвижной заготовки

Рисунок 1.10 – Схемы оборудования для ДУФ компании МІС[10]

На рисунке 1.11 показана установка МР 20000, разработанная компанией Wheelabrator.



Рисунок 1.11 – Установка MPF 20000 [114]

На установке MP 20000 реализуется двухсторонняя дробеобработка посредством двух четырёхкоординатных роботов, каждый из которых оснащен шестью воздушными соплами. Установка загружается смесью трёх фракций дробы, имеет систему её разделения и очистки.

Оборудование для дробеударного упрочнения крупногабаритных деталей выпускается рядом зарубежных компаний и широко представлено на рынке. Так, упомянутая установка MPF 20000 (см рисунок 1.11) может применяться как для формообразования, так и для упрочнения деталей.

В ряде источников упоминается применение абразивной зачистки в случае ухудшения шероховатости поверхности деталей, подвергаемых ДУФ. Выше было отмечено, что зачистка используется в технологическом процессе формообразования сложноконтурных листовых деталей компании Boeing. Известен патент этой же компании на четырёхосевую установку для зачистки лепестковыми абразивными кругами криволинейных деталей [85].

Из приведенного выше обзора зарубежных решений, применяемых для ДУФ, можно заключить следующее.

Оборудование, применяемое зарубежными компаниями и представляющее собой дробеструйные или дробемётные установки с внешней системой циркуляции дробы, является технически сложным и дорогостоящим.

Изготавливаемые детали должны специально проектироваться под описанную выше технологию. Они не должны иметь резких перепадов кривизны и толщины, седловидная область перегиба должна иметь максимально возможную длину.

Монолитно-фрезерованные панели с продольными рёбрами при достаточно высокой жесткости и простой (линейчатой) форме поверхности могут быть получены односторонней дробеобработкой на установках, подобных показанным на рисунках 1.9а и 1.10. Для изготовления ребристых панелей с областью перегиба может быть применен способ, предусматривающий двухстороннюю обработку рёбер, описанный в патенте [55]. Для этого

потребуется более сложное роботизированное оборудование типа установки MP 20000, компании Wheelabrator [114].

В открытых источниках имеется ограниченный объем информации о способах программирования процесса ДУФ, применяемых за рубежом.

Так, согласно [95] управляющие программы (УП) процесса ДУФ строятся на основе режимов обработки участков детали, в пределах которых кривизна и толщина принимаются постоянными (см. рисунок 1.12).

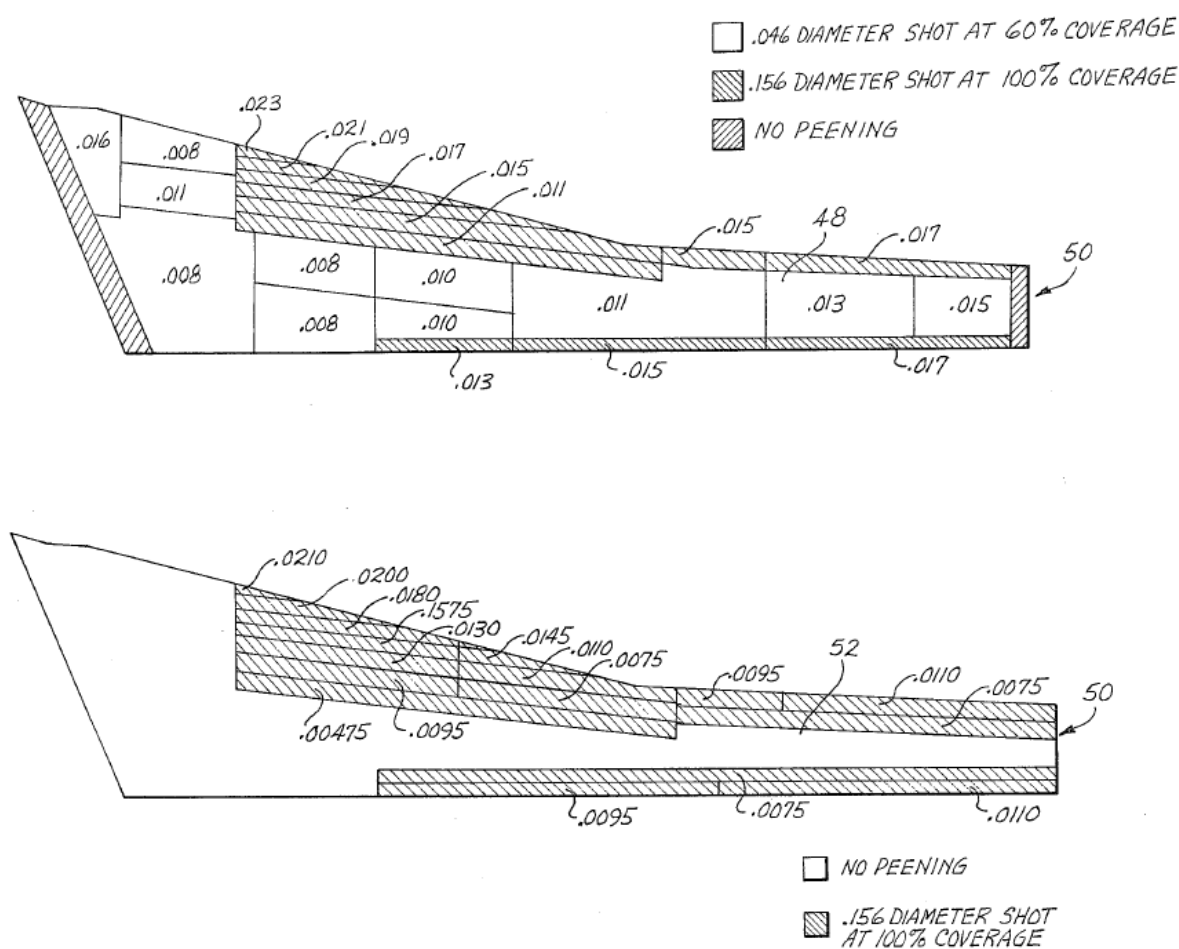


Рисунок 1.12 – Схема реализации УП процесса ДУФ сложноконтурных листовых деталей: для обработки наружной стороны (вверху) и двухсторонней обработки (внизу) по патенту США [95]

Режимы обработки, необходимые для достижения необходимой деформации удлинения и изгиба участков, определяются из базы эмпирических данных в виде зависимостей интенсивности дробеобработки от толщины участка детали

при заданной величине деформации. При этом, поскольку заготовка после фрезерования может иметь отклонение от плоскостности, для составления УП производится измерение её реальной формы и выполняется уточнение достигаемой при ДУФ кривизны.

Как отмечается в работе [123] способ получения УП процесса ДУФ, основанный на базе эмпирических данных, полученных путем обработки образцов, не может обеспечить необходимую точность формы деталей. В работе [95] говорится, что для составления УП процесса ДУФ необходимо проведение большого объема опытных работ на натуральных образцах. Особую сложность представляет формообразование перегиба – участка знакопеременной двойной кривизны (седловидной формы). Согласно [5] - это многошаговый процесс, в котором сочетается обработка дробью различных диаметров, заневоливание и растяжение кромок.

Согласно [123] и [131] показатели точности, достигаемые в зарубежном самолетостроении методом ДУФ, относительно невысоки. Так, точность контура деталей, образуемых с применением технологической линии Wheelabrator, составляет 1,3 мм. с приложением допустимой нагрузки 45,36 кг на сечение. Из этого следует, что применением установок, подобных вышеописанным, можно решить проблему автоматизации операции лишь предварительного формообразования, а для окончательного формирования контура с обеспечением требуемой точности необходима дополнительная (доводочная) операция обработки деталей, как это отмечается в работах [123, 131, 95].

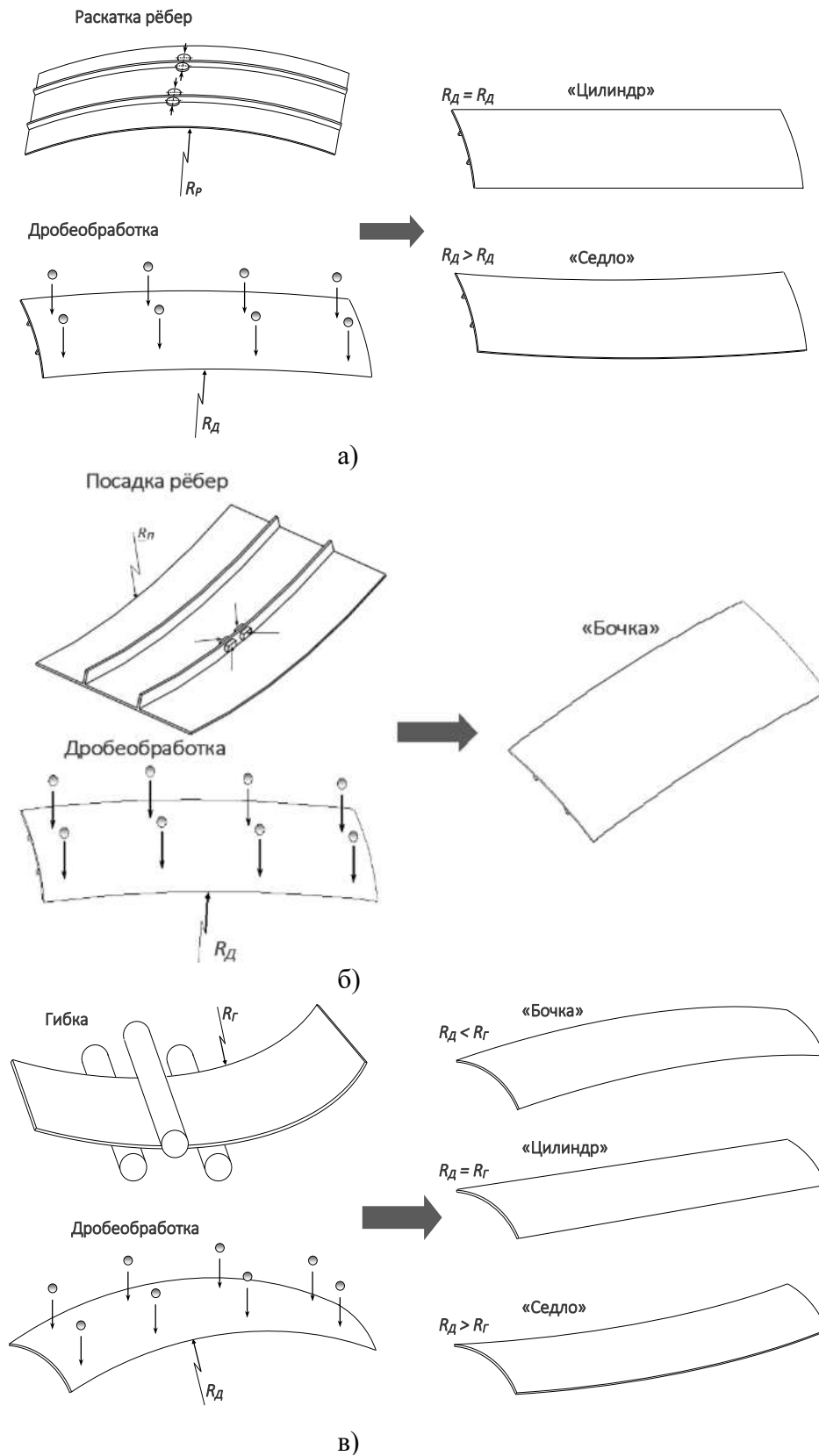
На сайте компании Sonaca Group, Aerosphere Inc., Канада нами обнаружены снимки процесса доводочной обработки панелей при помощи ручных дробеструйных установок (см. рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Доводка контура деталей: фото с сайта Sonaca Group [127]

Доводочная операция с применением ручных дробеструйных установок достаточно трудоёмка, требует высокой квалификации персонала, больших производственных площадей и может стать узким местом в производстве. Сведений о том, как реализуется данная операция ведущими авиастроительными компаниями Boeing и Airbus, нами не найдено.

Перспективной и апробированной отечественной разработкой является комбинированный метод формообразования панелей и обшивок, разработанный ИРНТУ. В данном случае продольная кривизна образуется упругопластической гибкой обшивок или локальным пластическим деформированием рёбер панелей, а поперечная – обработкой дробью наружной поверхности деталей, т.е. посредством ДУФ (см. рисунок 1.14).



а - раскатка рёбер панели – ДУФ; б - посадка рёбер панели – ДУФ; в - гибка обшивок в продольном направлении – ДУФ

Рисунок 1.14 - Схема комбинированных методов формообразования

Операции получения продольной кривизны обшивок могут выполняться на универсальном прессовом или валковом оборудовании

Для образования продольной кривизны монолитно-фрезерованных панелей используется специальное оборудование для местного пластического деформирования рёбер раскаткой роликами и посадкой. Работы по разработке такого оборудования ведутся ИРНИТУ. На рисунке 1.15 показана установка УФП-1, предназначенная для формообразования и правки участков деталей с длиной равной длине направляющих, по которым перемещается манипулятор с рабочим органом.



Рисунок 1.15 – Установка УФП-1 для формообразования и правки раскаткой роликами

Для реализации операций ДУФ и зачистки, выполняемых посредством последовательной обработки наружной (аэродинамической) поверхности

детали, ИРНТУ разработан ряд установок серии УДФ, принципиальным отличием которых от импортного оборудования с проходными рабочими камерами является использование рабочих органов контактного типа – дробемётных аппаратов и зачистных головок, перемещающихся относительно неподвижной детали.

Типовая схема ДУФ участка листовой детали типа «обшивка» на дробеметной установке контактного типа, в которой рабочий орган перемещается относительно заготовки, закрепленной в фиксирующем приспособлении, приведена на рисунке 1.16.

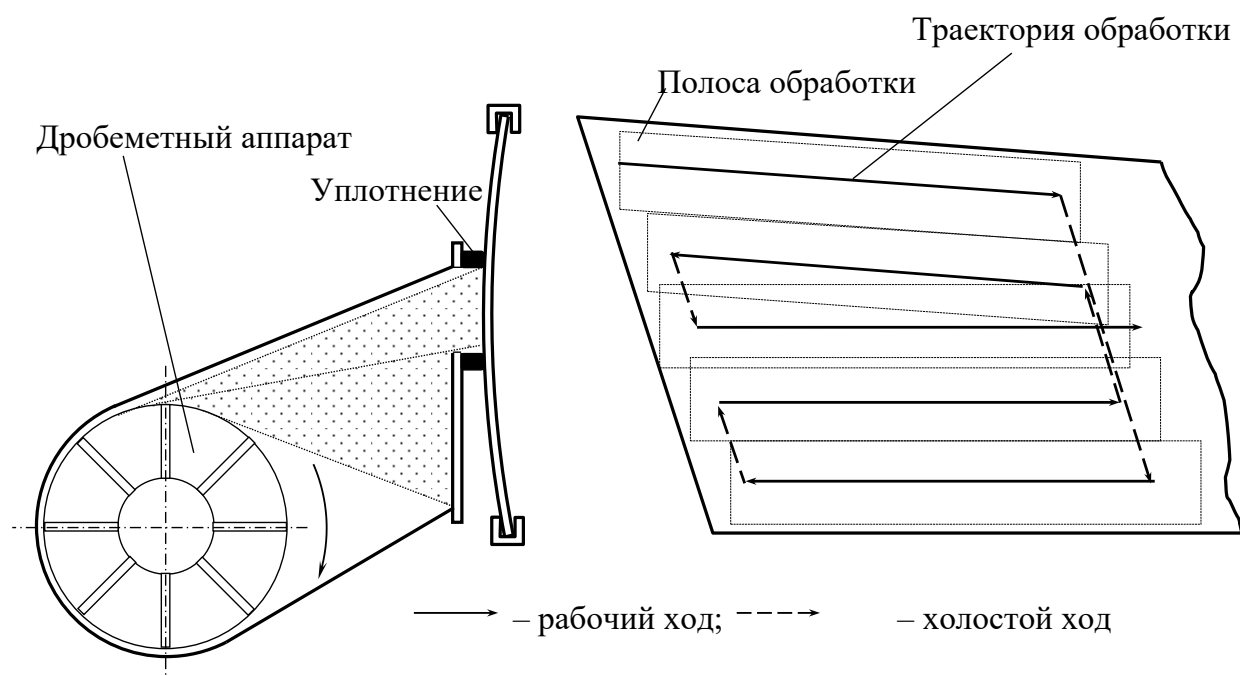


Рисунок 1.16 – Схема процесса ДУФ на установке контактного типа [60]

В процессе ДУФ обработку выполняют полосами, параллельными продольным кромкам заготовки. Последовательность обработки назначают от периферии к центру, от участков повышенной жесткости к менее жестким.

На рисунке 1.17 показана установка УДФ-4, внедренная на ИАЗ и обеспечивающая возможность формообразования деталей с размерами в плане 1200x13000 мм.



а)



б)



в)

а - формообразование панели крыла самолёта БЕ-200 на установке для дробеударного формообразования и зачистки УДФ-4; б - дробеметный аппарат ЗД400М;
в - зачистная головка ЗГР-1 установки УДФ-4

Рисунок 1.17 – Установка УДФ-4 для формообразования детали дробью

Операция ДУФ на установке контактного типа включает два технологических перехода – предварительный и доводочный. Предварительное формообразование осуществляется в программном режиме в целях получения 70-90% от требуемой кривизны. Схема реализации УП предварительного ДУФ панели крыла самолёта БЕ-200 с размерами в плане 11,2x1,2 метра приведена на рисунке 1.18. При формообразовании панелей крыла самолёта БЕ-200 на ИАЗ доводочная обработка выполнялась в ручном режиме управления с контролем

формы детали при помощи шаблонов контура сечения (ШКС). Время формообразования деталей составляло до 9 часов. Это связано с ограниченными размерами зоны обработки ДА (максимум 400 мм). В случае использования установок контактного типа при формообразовании крупногабаритных деталей, размеры которых могут составлять более 25х2 метров и более, время обработки значительно увеличится. В связи с этим необходимо принять меры по повышению производительности процесса.

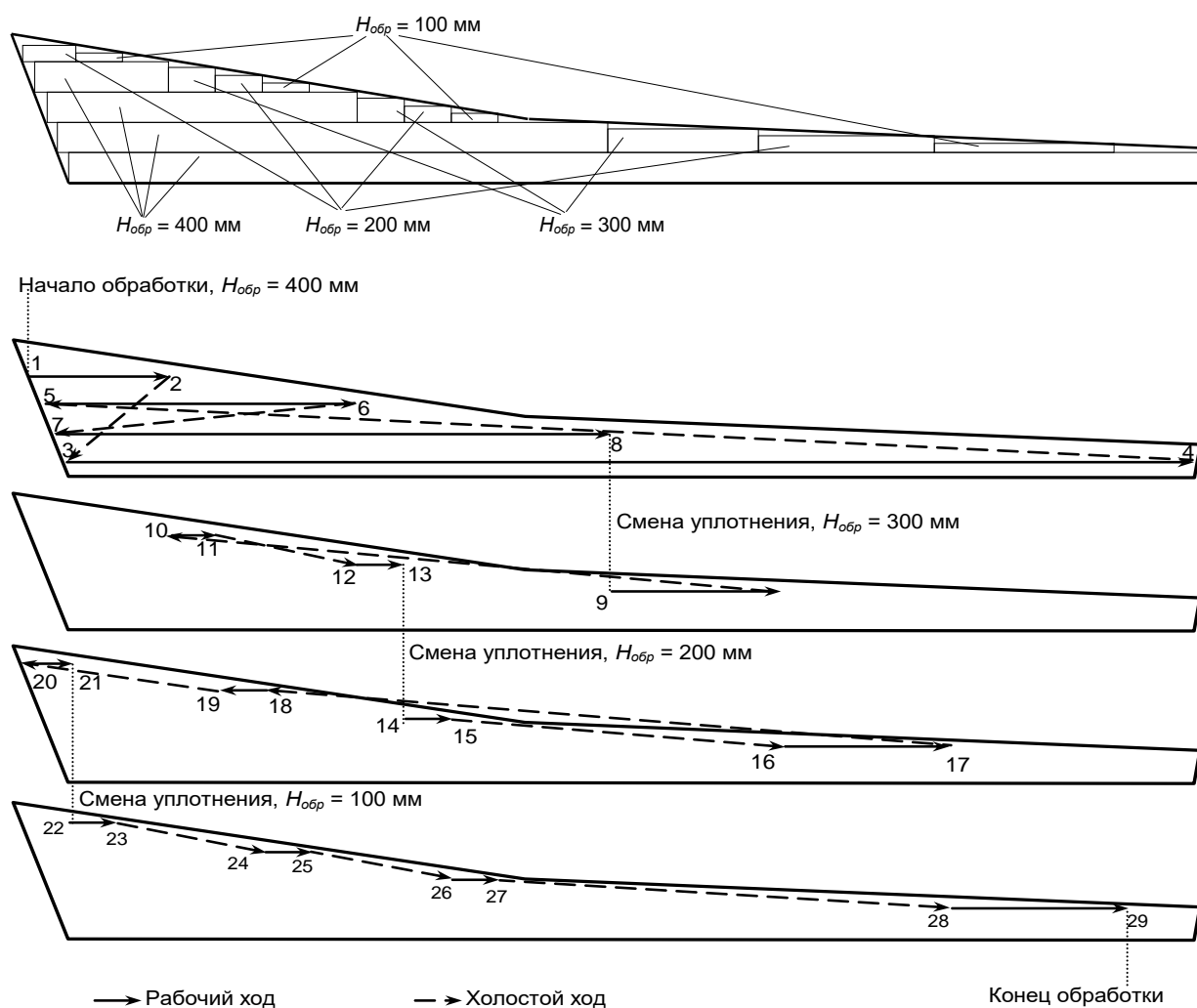
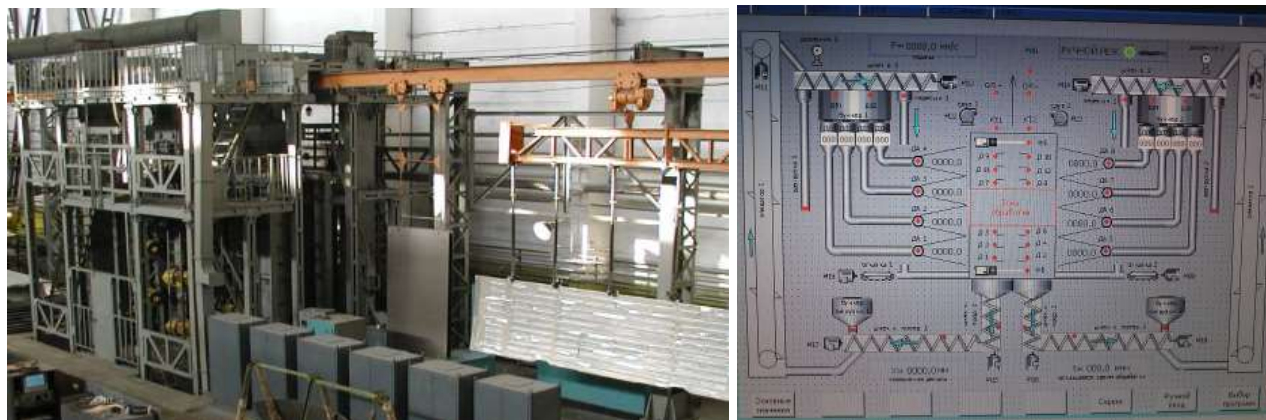


Рисунок 1.18 – Схема реализации УП предварительного ДУФ на установке контактного типа [8]

Для поверхностного упрочнения деталей могут быть использованы установки серии УДП, разработанные НИАТ. На рисунке 1.19 показана

установка УДП-2-2,5, используемая Иркутским Авиационным заводом (ИАЗ). Модернизация данной установки путем оснащения современной системой ЧПУ была выполнена в ИРНТУ в 2012 г. Это дало возможность значительно повысить точность регулирования частоты вращения дробемётных аппаратов (ДА) и скорость подачи детали.



а)

б)

а - УДП-2-2,5; б - разработанный при модернизации интерфейс системы ЧПУ

Рисунок 1.19 – Установка дробемётная программная УДП-2-2,5

При использовании дробемётных установок проходного типа основными технологическими схемами процесса являются односторонняя или одновременная двухсторонняя обработка (см. рисунок 1.20). При этом деталь перемещается через стационарную рабочую камеру, а интенсивность обработки может регулироваться изменением частоты вращения ДА [44].

Одним из важнейших критериев оценки качества получаемых деталей является показатель точности формы. Контроль может выполняться как традиционными методами при помощи ШКС, так и с использованием современных измерительных средств: контактных – при помощи измерительных головок, и бесконтактных – лазерных трекеров и сканеров. Использование автоматизированных средств оцифровывания результата позволяет получить наиболее точную схему кривизны поверхности детали [89].

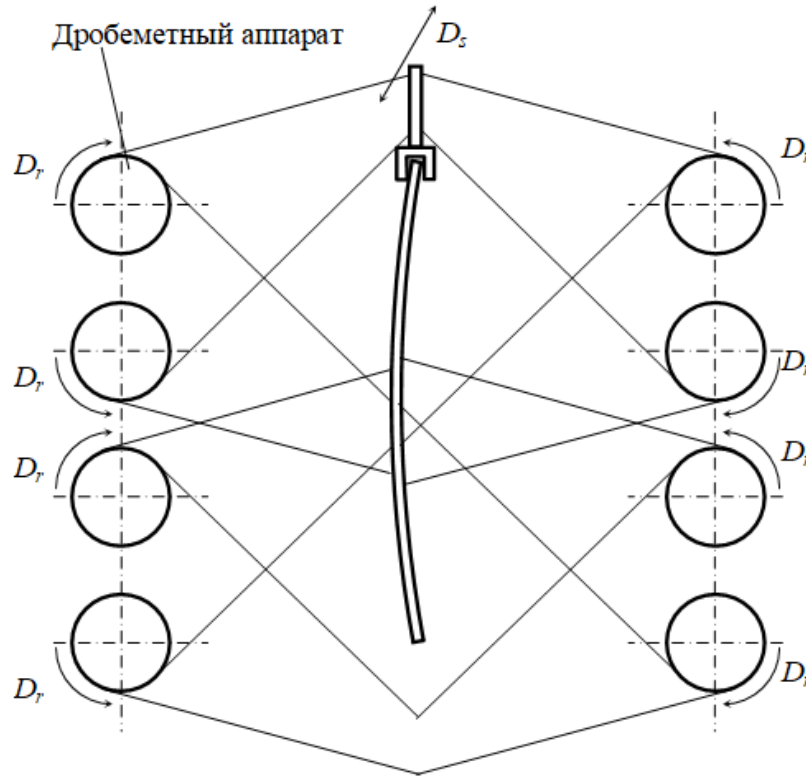


Рисунок 1.20 – Схема процесса упрочнения детали на дробеметной установке проходного типа [61]

1.3 Теоретические и экспериментальные исследования технологического процесса ДУФ

Аналитическому описанию физической природы процесса обработки дробью и возникающего при этом НДС посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей [18, 20, 62, 63, 64].

Общая деформация деталей при ДУФ обусловлена необратимым увеличением линейных размеров деформированного поверхностного слоя. Для расчета возникающих в связи с этим остаточных напряжений используют стержневые модели, начиная с работ Н.Н. Давиденкова [14] и В.В. Абрамова [1]. В [5, 60] уравнение стержневой модели приводится в виде:

$$\sigma^o = E \left(\frac{1}{F} \int_F \varepsilon^o dF + \frac{y}{J_x F} \int y \varepsilon^o dF + \frac{x}{J_y F} \int x \varepsilon^o dF - \varepsilon^o \right), \quad (1.1)$$

где σ^o – остаточные напряжения (ОН) в стержне; ε^o – деформация в осевом направлении стержня, названная И.А. Биргером первоначальной деформацией; F – площадь поперечного сечения стержня; J_x, J_y – главные моменты инерции стержня; E – модуль упругости первого рода.

Образование ОН при поверхностной обработке можно трактовать как процесс уравнивания напряжений, соответствующих первоначальной деформации ε^o по силе и моменту. Величина этих напряжений будет обусловлена их отклонением от интегральных по сечению значений, определяемых уравнениями равновесия. Данные напряжения названы в работе [26] начальными. В зарубежной литературе применяется термин «индуцированные напряжения» [78, 82, 91].

Начальные напряжения (НН) σ^H в отличие от ОН являются неуравновешенной нагрузкой. Их действие эквивалентно приложению к детали, подвергнутой поверхностной обработке, осевой силы P и изгибающего момента M , действие которых в закреплённом состоянии компенсируется внешними силами зажима. После раскрепления происходит деформация мало жесткой детали в виде изгиба и удлинения (укорочения). В результате деформации НН перераспределяются по всему сечению детали, принимают равновесное состояние и превращаются в ОН (см. рисунок 1.21).

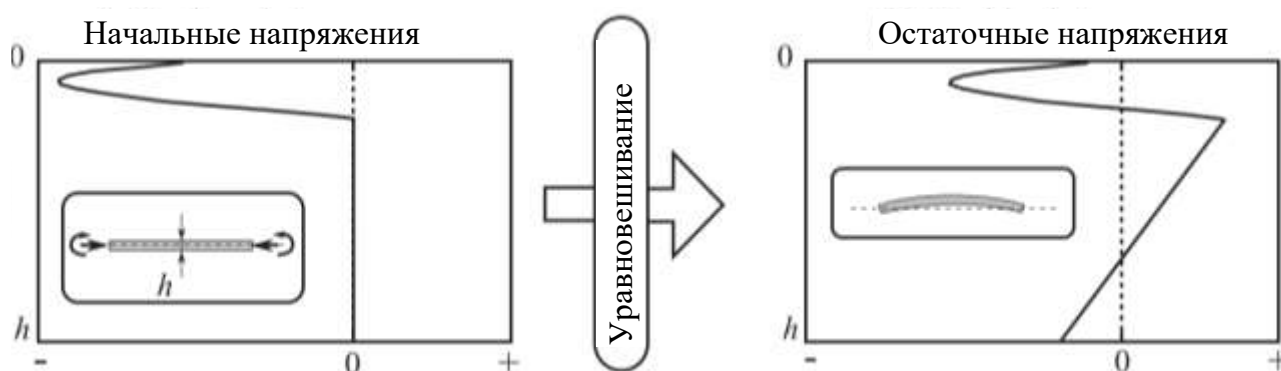


Рисунок 1.21 – Схема к определению остаточных напряжений [92]

Эпюра ОН может быть найдена алгебраическим суммированием эпюры НН σ^H , эпюры от осевой силы σ^P и эпюры от изгибающего момента σ_M [42]:

$$\sigma^o = \sigma^H + \sigma_P + \sigma_M \quad (1.2)$$

При аналитическом описании эпюр начальных (остаточных) напряжений используют различные алгебраические аппроксимации: прямоугольную [64], треугольную [63], экспоненциальную [19], степенную [68], косинусную [115] и ряд других. Данные аппроксимации объединяет интегральное равенство площадей эпюр при одной и той же степени поверхностной деформации. Наиболее удобными для анализа являются аппроксимации остаточных (начальных) напряжений линейными и линейно-полигональными функциями (см. рисунок 1.22).

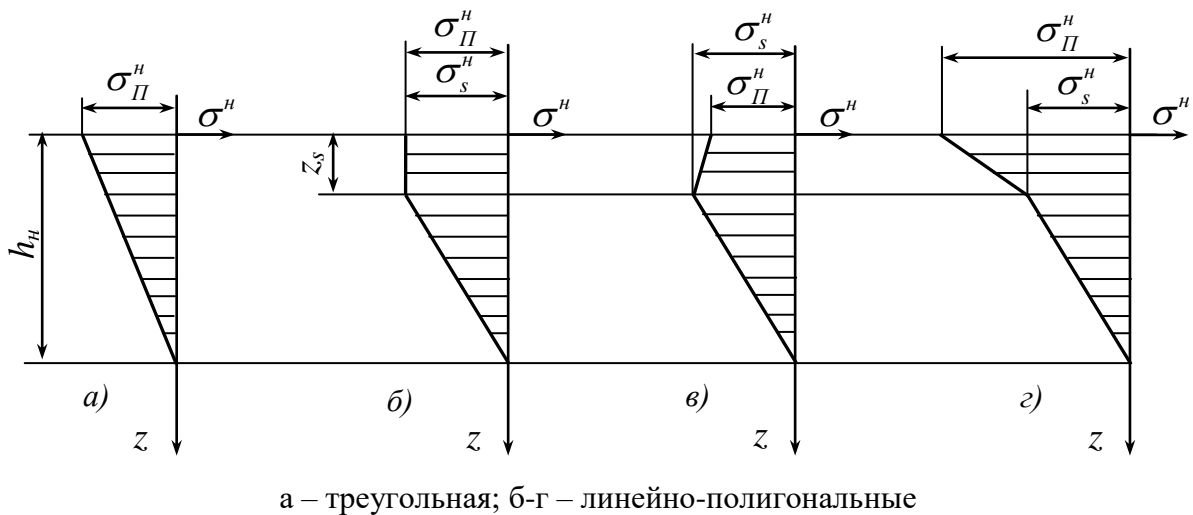


Рисунок 1.22 – Аппроксимации эпюр начальных напряжений [60]

Кривизна детали, подвергнутой ДУФ, определяется выражением [60]

$$\kappa_x^{ДУФ} = \frac{12P}{EK_y H_{np}^3} (Z_0 - z_c), \quad (1.3)$$

где P – внутренняя сила, являющаяся интегральным значением эпюры НН;
 z_c – координата точки приложения силы P (центр тяжести эпюры);

Z_0 – координата нейтрального слоя детали;

K_y – коэффициент вида НДС;

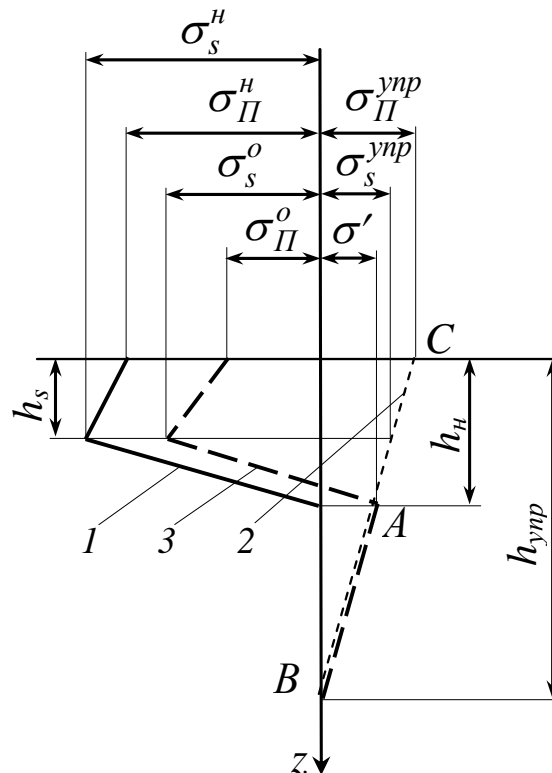
H_{np} – приведенная толщина детали, определенная с учетом её пространственной формы.

В работе [60] параметры P и z_c названы внутренними силовыми факторами процесса поверхностной обработки, для их определения приведены следующие выражения:

$$P = -\frac{1}{2}(\sigma_{II}^H z_s + \sigma_s^H h_H) \quad (1.4)$$

$$z_c = \frac{\sigma_{II}^H z_s^2 + \sigma_s^H (3z_s^2 - 2z_s h_H + h_H^2)}{3(\sigma_{II}^H z_s + \sigma_s^H h_H)} \quad (1.5)$$

На рисунке 1.23 показана схема к определению НН по известной эпюре ОН, обусловленных обработкой дробью упругопластического полупространства из работы [117].



1 – начальные напряжения сжатия; 2 – реактивные напряжения в прилегающих к очагу деформации слоях металла; 3 – остаточные напряжения (сумма эпюр 1 и 2)

Рисунок 1.23 – Схема образования остаточных напряжений, обусловленных единичным внедрением дробинки

В этой же работе получены выражения для определения параметров распределения ОН.

$$\sigma_{II}^H = \sigma_{II}^o - \sigma' \left(1 + \frac{h_n}{h_{yup} - h_n} \right); \quad (1.6)$$

$$\sigma_s^H = \sigma_s^o - \sigma' \left(1 - \frac{h_s - h_n}{h_{yup} - h_n} \right) \quad (1.7)$$

Таким образом, определив ОН, вызванные обработкой дробью, можно найти внутренние силовые факторы процесса и рассчитать формоизменение обработанной детали.

Существуют две основные группы экспериментальных методов определения технологических ОН – неразрушающие (физические) и разрушающие (механические).

Физические методы базируются на наличии зависимостей между величиной ОН и параметрами материала, такими, как магнитная проницаемость, искажение кристаллической решетки, изменение скорости распространения упругой волны и т.п. [6, 21, 40, 72, 121]. На выбранные параметры влияют не только поля напряжений, но и ряд других факторов, связанных со структурными изменениями материала. Для учета таких факторов обычно проводят предварительные тестовые испытания на образцах-эталонах, изготовленных из того же материала, но свободных от ОН. В большинстве случаев результаты измерений поверхностных ОН, полученных физическими методами, носят качественный характер, и применяются для контроля изделий, где выход из требуемого диапазона напряжений являются причиной отбраковки конкретного изделия из партии.

Механические методы определения ОН в отличие от физических методов не зависят от структурного состояния материала и базируются на неизменности его модуля упругости [5, 14, 21, 24]. К ним относятся методы, основанные на измерении деформации образцов после удаления с них слоев металла, разрезки на полоски, создания канавок, отверстий и т.д. К преимуществам механических

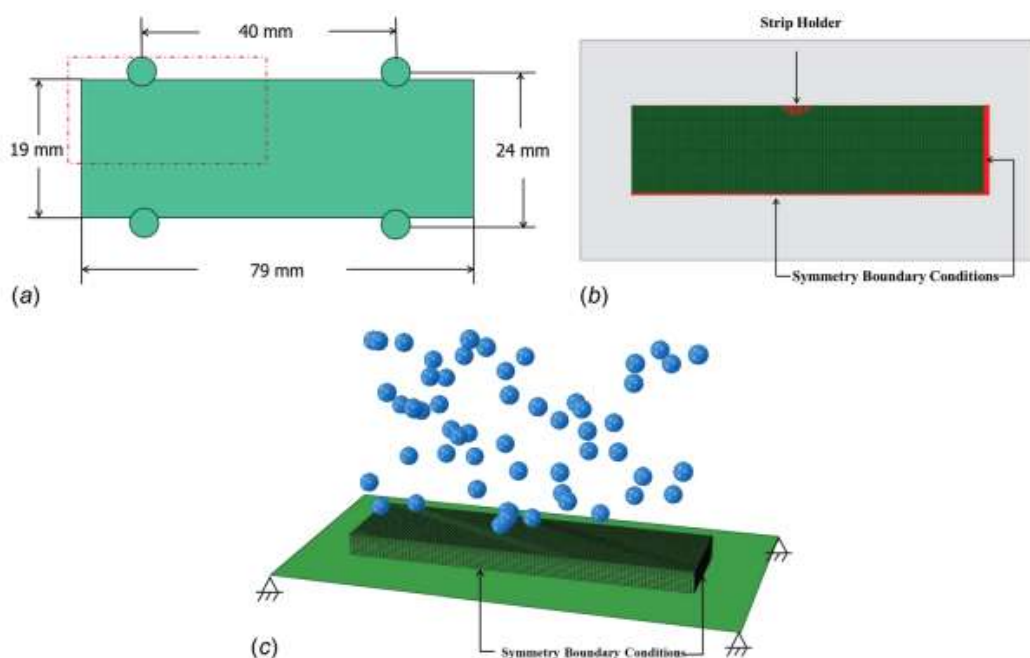
методов относятся их точность и надежность, а также возможность получения распределений ОН по глубине. Очевидным недостатком является их разрушающий характер. Кроме того, в ходе обработки образцов могут создаваться добавочные ОН, что снижает точность измерений.

Аналитические методы определения НДС, возникающие при ДУФ, достаточно трудоёмки, базируются на эмпирических данных и не обеспечивают требуемой точности расчётов.

С развитием метода конечных элементов и увеличением вычислительных мощностей становится возможным численное моделирование процесса обработки дробью с целью определения НДС образцов на основе конечно-элементных моделей (КЭМ) единичного или массового внедрения.

В ряде публикаций [107, 138] приведены результаты КЭМ с целью вычисления деформации пластин Альмена при обработке дробью.

В работе [138] описана трёхмерная твердотельная КЭМ пластинки Альмена, которая подвергалась множественным ударам дроби (см. рисунок 1.24).



а - схематическое изображение пластины Альмена; б - вид сверху полоски с граничными условиями; в - 3D-вид полной модели КЭМ

Рисунок 1.24 - Исследуемая КЭМ [138]

Моделирование выполнялось путём внедрения в случайном порядке определённого количества дробинок, имеющих одинаковые скорости. При этом затраченное на расчет время (10 часов для пластинки площадью 1450 мм²) является крайне большим [91]. Таким образом, предложенная схема моделирования применима к листовым деталям небольших размеров при дробеударной обработке, моделирование таким способом процесса обработки реальных деталей не продуктивно.

Более эффективными в вычислительном отношении являются подходы к решению задач определения формоизменения реальных деталей при обработке дробью, основанные на приложении ЭН, поскольку, как показано в ряде источников [57, 93, 99, 133] и др., при достаточно большом количестве ударов дробью в поверхностном слое создаётся однородное НДС.

Из анализа публикаций можно выделить следующие подходы к нахождению эквивалентной нагрузки, обусловленной обработкой дробью. В работах [93, 103] в качестве такой нагрузки используют распределение деформаций, полученное моделированием внедрения процесса обработки дробью.

В [111, 132] макроскопическую пластическую деформацию создают путём температурного расширения поверхностного слоя.

Авторы [119] описывают подход к моделированию процесса ДУФ путём нагружения эквивалентными силами предварительно рассчитанными по формулам (1.3) (см. рисунок 1.25).

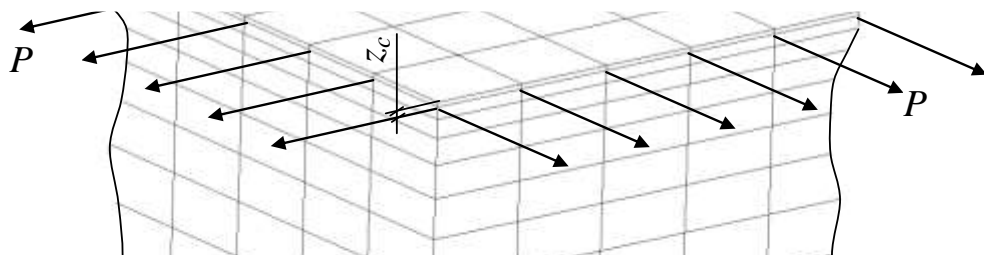


Рисунок 1.25 – Приложение растягивающей силы к узлам модели образца

В работах [91, 92, 105], для увеличения точности моделирования процесса ДУФ НН и деформаций внедряются в поверхностный слой модели согласно имеющейся эпюре. На рисунке 1.26 показана трёхслойная структура поверхностного слоя детали, представленная в виде элементов композиционной оболочки.

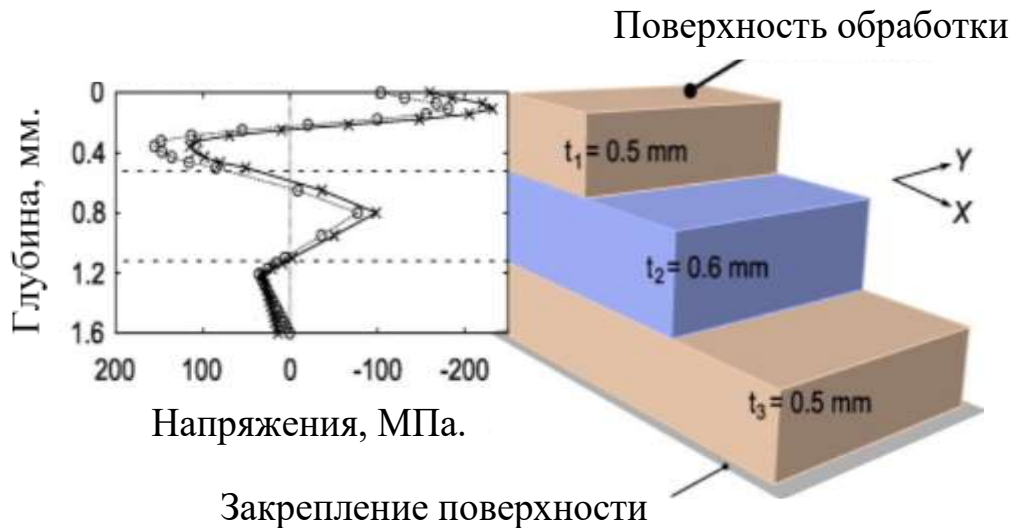


Рисунок 1.26 – Слоистая структура элементов оболочки [91]

В качестве исходных данных в большинстве отмеченных методик необходимо распределение ОН, возникающих вследствие обработки дробью. Известен ряд публикаций, в которых описаны подходы к определению данных напряжений путём моделирования процесса обработки дробью.

В работе [78] представлена модель упругопластического сферического вдавливания для расчета профиля ОН при определенной скорости дроби.

Авторы работ [112, 91] предложили КЭМ для определения таких параметров процесса ДУФ, как ОН и микрорельеф обработанной поверхности. В данных работах моделируются процессы последовательно детерминированного и случайного внедрения в толстостенный образец определённого количества шариков, как с одинаковыми диаметрами, так и с диаметрами, изменяющимися в определённом диапазоне. При этом внедрение дробинок происходит независимо друг от друга с одинаковой скоростью и углом

соударения.

В работах [54] и [57] описан процесс получения эпюр ОН, возникающих вследствие обработки дробью, с учётом реальной структуры зоны обработки ДА контактного типа, для которой характерно хаотичное внедрение шариков в поверхность детали. Моделирование осуществлялось путём внедрения партии шариков с различными скоростями и углами падения. После внедрения первой партии шариков деформированная сетка конечных элементов импортировалась в новую расчетную модель, и осуществлялось внедрение следующей партии с координатами шариков, сгенерированными случайным образом, после чего расчет повторялся. Результаты моделирования процесса обработки с нарастающей степенью покрытия показаны на рисунке 1.27.

На поверхности детали, обработанной при ДУФ, формируется микрорельеф, интегральным параметром которого является степень покрытия отпечатками дробинки, которая определяется как процент площади отпечатков на заданной площади, подвергнутой обработке в течение определённого времени. В ряде публикаций приведены подходы к определению микрорельефа и степени покрытия, характерной для ДУФ.

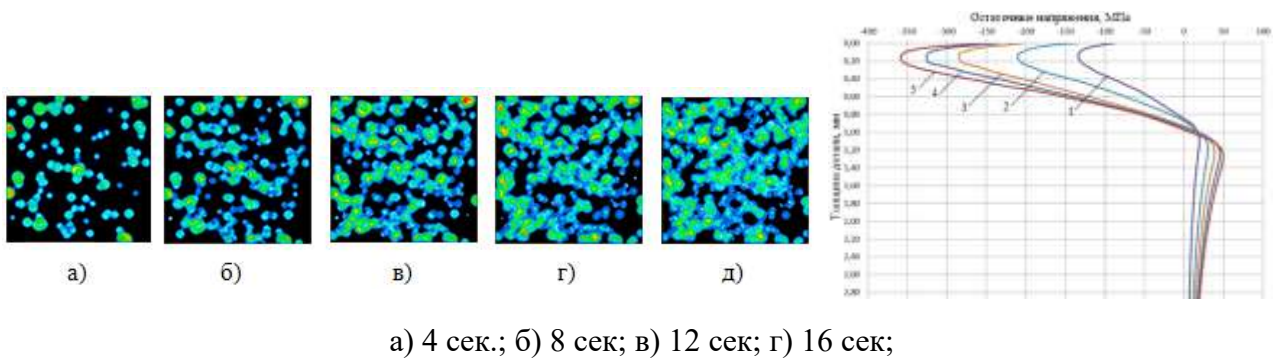


Рисунок 1.27 – Распределения остаточной деформации при множественном внедрении для времени обработки

В работе [16] описан способ определения степени покрытия, регламентированный стандартом SAE 2277. Способ заключается в нанесении флуоресцентной краски на необработанную поверхность детали, обработке

детали дробью, освещении ультрафиолетовым излучением и автоматизированной обработке изображения поверхности. Использование эффекта свечения краски на необработанной поверхности даёт возможность определить относительную площадь поверхности под краской и таким образом найти степень покрытия.

Авторы [130] описывают метод анализа изображения обработанного дробью участка поверхности, основанный на распознавании световых пятен с помощью машинного зрения. Количество и местоположение отпечатков на изображении определяют, используя центральное световое пятно в качестве идентификатора отпечатка. Применение данного метода позволяет сократить время вычислений, недостатком является необходимость в значительных вычислительных мощностях.

В работе [57] описана методика определения параметров микрорельефа путём сканирования обработанных дробью образцов при помощи 3D-оптического профилометра с дальнейшим определением параметров отпечатков ручной обводкой в графическом редакторе. Методика обеспечивает высокую точность определения параметров микрорельефа, однако отличается высокой трудоемкостью и неприменима в производственных условиях.

Во всех отмеченных работах моделирование процесса ДУФ выполнялось на образцах в виде пластин или участков деталей небольших размеров (до 1 м) с неизменными геометрическими параметрами.

В работах [92] и [111] исследовались возможности применения КЭМ для процессов ДУФ типовых панелей обшивки крыла самолёта. Методика, предложенная в [92], предусматривает формирование БД в виде зависимостей, связывающих изгиб и удлинение образцов-пластин из материала деталей с режимными параметрами процесса ДУФ, и определённых КЭМ. Дальнейшее нагружение деталей осуществлялось ЭН в виде НН, соответствующих режимам обработки и выбранных из базы данных. На рисунках 1.28 и 1.29 приведена последовательность нагружения и результаты моделирования детали типа панели крыла с рёбрами жесткости.

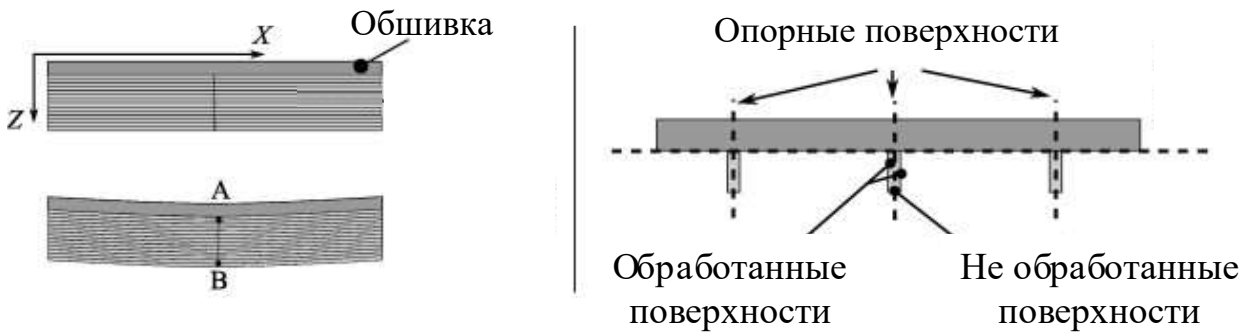
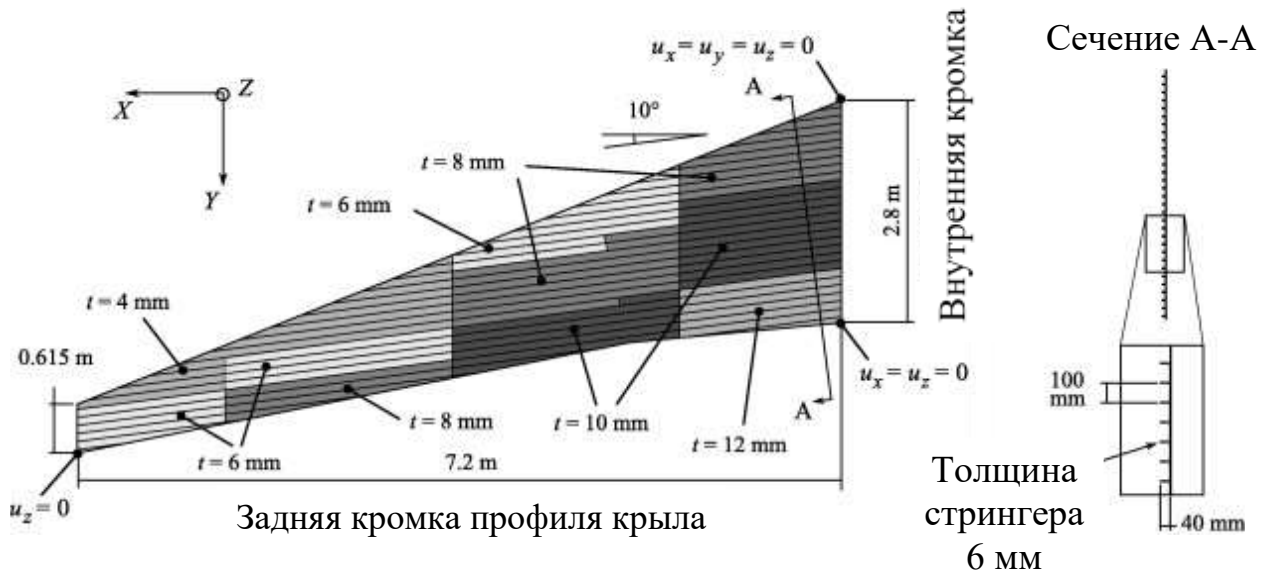


Рисунок 1.28 – Схема моделирования процесса ДУФ панели крыла с рёбрами жесткости [92]

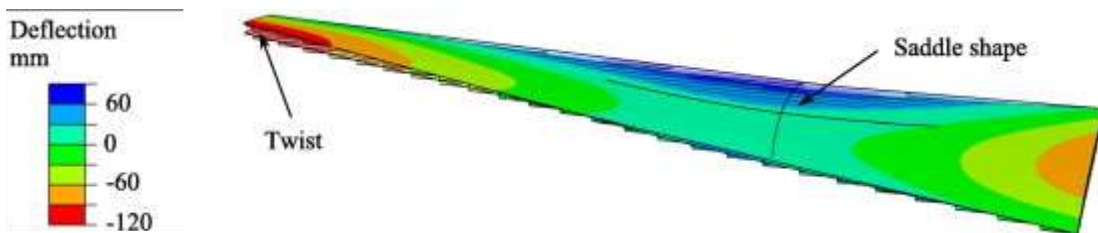


Рисунок 1.29 – Деформированная модель панели крыла с рёбрами жесткости после ДУФ [92]

Полученные в [92] результаты имеют качественный характер, поскольку как было отмечено авторами, «не ставилась задача получения конкретного

контура, что требует значительных инвестиций и знаний процесса». При этом не удалось достичь результатов по формированию поверхности с требуемым сочетанием продольной и поперечной кривизны.

Современным подходом к повышению точности и эффективности технологических расчётов является использование машинного обучения (МО) для предсказания поведения детали в процессе обработки. Это позволяет не только оптимизировать технологию, но и значительно сократить затраты на изготовление деталей путем повышения производительности процесса подготовки управляющих программ (УП) [74, 97].

Большинство методов МО основываются на создании моделей, предназначенных для осуществления прогнозирования. Этот процесс включает в себя несколько ключевых этапов, начиная с определения задачи и заканчивая применением модели на новых данных [137]. Одним из методов МО является «Дерево решений», которое представляет собой контролируемый метод обучения, применимый как для задач классификации, так и для регрессии. Дерево решений функционирует на основе принципа итеративного разделения данных через запросы. Чем более информативны задаваемые запросы, тем выше точность модели [109].

Алгоритмы МО классифицируются по широким категориям с помощью следующих метрик:

1. Сравнение новых данных с данными, использованными для обучения модели, или создания шаблонов, на основе обучающих данных для формирования прогнозов;
2. Алгоритмы с человеческим контролем или без него во время обучения модели. Модель обучается на неразмеченных данных, где выходные значения неизвестны;
3. Алгоритмы, обучающиеся посредством пакетного обучения или обучения в режиме реального времени.

Методы МО обеспечивают достаточную точность прогнозирования поведения деталей. Однако для достижения этого необходимо:

- подготовить качественные входные данные для обучения модели;
- подобрать соответствующий алгоритм машинного обучения;
- провести сравнительную оценку полученных результатов с экспериментальными данными.

При соблюдении всех этих условий на выходе формируется алгоритм, который прогнозирует поведение изделий в процессе их обработки.

Пример использования МО для обратной идентификации неоднородных свойств материала – сопоставления измеренных полей смещения/деформации и случайно распределенного поля модуля упругости показан на рисунке 1.30.

На этапе предварительной обработки данных поля деформации и модуля упругости преобразуются в частотную область с использованием дискретного косинусного преобразования, при этом сохраняются только основные признаки, представляющие собой низкочастотные коэффициенты, для последующего этапа машинного обучения. Далее формируется модель глубокого обучения в частотной области, которая принимает основные признаки полей деформации в качестве входных данных и поля модуля упругости в качестве выходных. На финальном этапе постобработки предсказанные основные признаки в частотной области поля модуля упругости, полученные с помощью МО, восстанавливаются до исходного размера, а затем преобразуются обратно в поле модуля упругости с использованием обратного дискретного косинусного преобразования [137].

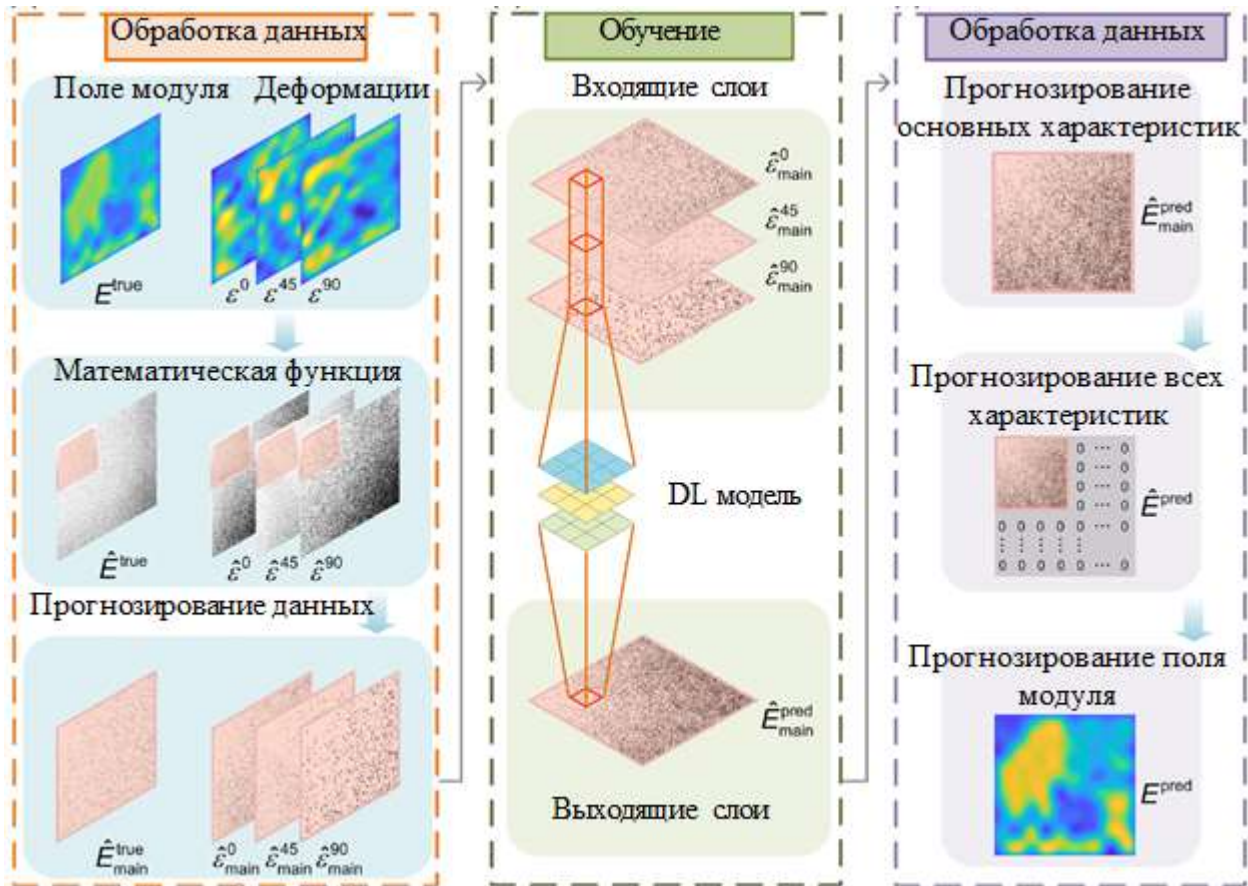


Рисунок 1.30 – Рабочий процесс глубокого обучения в частотной области для обратной идентификации неоднородного поля модуля Юнга [137]

Подобная методика применяется для обнаружения невидимых дефектов и трещин в панелях обшивки самолетов с помощью измеренных полей деформации может эффективно прогнозировать срок службы стареющих самолетов.

Используя методы КЭМ совместно с МО, можно предсказывать поведение детали при ДУФ. Авторы [134] применили такой подход для моделирования поведения типовой монолитно-фрезерованной панели с продольно-поперечным оребрением, применяемой в аэрокосмической отрасли. Моделирование продемонстрировало корреляцию с некоторыми тенденциями, описанными в работе [120], хотя ряд важных моделей поведения детали все еще не был адекватно предсказан (см. рисунок 1.31).



Рисунок 1.31 - Генерация траектории обработки на основе МО [134]

1.4 Постановка целей и задач исследования

Исходя из вышеизложенного, была сформулирована цель диссертационной работы: совершенствование структуры и научно-методического обеспечения технологического процесса дробеударного формообразования обводообразующих деталей типа панелей и обшивок на оборудовании с ЧПУ на основе создания новых расчетных методик, базирующихся на МО и направленных на повышение адекватности конечно-элементного моделирования процесса ДУФ, а также программного обеспечения для назначения режимных параметров и генерации управляющих программ.

Задачи исследования:

1. Разработка методики и специального программного обеспечения с использованием алгоритмов машинного обучения для определения эквивалентной нагрузки, вызывающей формоизменение деталей при дробеударном формообразовании, в виде эпюры начальных напряжений и деформаций в поверхностном слое с учётом реальных свойств материала, фракционного состава дроби и микрорельефа обработанной поверхности.

2. Разработка высокопроизводительных способов автоматизированного определения фракционного состава дроби, применяемой при дробеударном формообразовании, и диаметров отпечатков, образующихся на обработанной поверхности, с применением машинного зрения и алгоритмов машинного обучения.

3. Разработка методики конечно-элементного моделирования процесса дробеударного формообразования расчётных участков в виде типовых конструктивных элементов деталей, обеспечивающей повышение адекватности расчёта за счёт использования в качестве эквивалентной нагрузки эпюр начальных напряжений и деформаций в поверхностном слое, связанных с режимными параметрами процесса обработки дробью.

4. Разработка методики и программного обеспечения для назначения режимных параметров процесса дробеударного формообразования на оборудовании контактного и проходного типов на основе предварительно сформированной базы данных зависимостей кривизны расчётных участков деталей от величины эквивалентной нагрузки в виде эпюр начальных напряжений и деформаций в поверхностном слое.

5. Разработка методики и программного обеспечения для автоматизированного анализа геометрических параметров детали по её CAD модели с разбивкой детали на расчётные участки для дальнейшего назначения режимов процесса дробеударного формообразования и маршрутов обработки.

6. Разработка структуры технологического процесса автоматизированного формообразования крупногабаритных обводообразующих

деталей типа панелей и обшивок с применением дробеударного оборудования проходного типа для черновой формообразующей обработки и оборудования контактного типа для доводочного дробеударного формообразования.

7. Проведение экспериментальных исследований по проверке адекватности результатов моделирования процесса дробеударного формообразования на конструктивно-подобных образцах деталей.

2. Цифровые решения при моделировании процесса ДУФ

2.1 Совершенствование методики конечно-элементного моделирования процесса ДУФ

Для реализации технологической подготовки производства процесса ДУФ с применением цифровых методов необходимо формирование и поддержание баз данных (БД) зависимостей параметров эквивалентной нагрузки (ЭН), возникающей в поверхностном слое детали, от режимов и условий обработки. ЭН, в данном случае, определяется эпюрой начальных напряжений (НН), зависящих от структуры зоны обработки дробью, которая представляет собой совокупность отпечатков разных диаметров.

В работах [35, 54, 53, 57] приведены результаты определения НН и внутренних силовых факторов процесса ДУФ при помощи КЭМ. Модель процесса имитирует поток дроби реального устройства, структура которого определяется на основе сканирования обработанной поверхности при помощи 3D оптического профилометра. В данной методике «узким местом» является способ определения диаметров отпечатков дроби на исследуемом участке поверхности – ручная обводка окружностями в графическом редакторе.

В качестве ЭН при моделировании процесса ДУФ для деталей конечных размеров авторы используют рассчитываемые по формулам (1.4) и (1.5) внутреннюю силу (интегральное значение НН) и координату точки приложения данной силы. Необходимые для вычислений параметры получают из линейно-полигональных аппроксимаций эпюр ОН, преобразованных в эпюры НН, что снижает точность и повышает трудоёмкость расчётов. Следует отметить, что при построении КЭМ процесса ДУФ, в отличие от процесса упрочнения дробью в существующих методиках пренебрегается возможный разброс размеров дроби, влияющий на диаметр формируемых отпечатков и соответствующие силовые факторы. Кроме того, как показали исследования [36, 53], при моделировании формообразования путем приложения внутренней силы существуют

значительные ограничения по выбору размеров и соотношения сторон деталей, а также получению переменной кривизны.

В целях снижения трудоёмкости и повышения точности расчетов, предлагается методика моделирования процесса ДУФ, реализуемая путем внедрения в поверхностный слой детали эпюр НН и деформаций, имитирующих растяжение поверхности после обработки дробью. Входными параметрами для моделирования являются свойства материала деталей, а также параметры распределения эпюр НН, которые определяются на основе экспериментальных исследований по обработке дробью образцов свидетелей и автоматизированного определения фракционного состава диаметров отпечатков. На основе входных данных выполняется построение модели множественного внедрения дроби с разбросом ее размеров и определение эпюр НН и деформаций.

Данная методика реализуется в следующей последовательности:

1. Определение механических свойств обрабатываемых деталей.

1.1. Подготовка образцов. В качестве образцов для проведения испытаний используются образцы-пластины, из материала, соответствующего материалу реальных деталей – В95пчТ2 (во всех исследуемых далее образцах применяется единый материал) [11].

1.2. Проведение испытаний на растяжение.

2. Определение фракционного состава дроби и параметров микрорельефа поверхности, обработанной при ДУФ

2.1 Определение фракционного состава дроби, применяемой при ДУФ. Выполняется путем измерения партии дроби с использованием камеры с машинным зрением.

2.2. Подготовка образцов. В качестве образцов для определения фракционного состава диаметров отпечатков от дроби, после ДУФ используются образцы-пластины, размерами 40x40x4 мм из материала, соответствующего материалу деталей со специальными требованиями по шероховатости поверхности, подвергаемой обработке дробью.

2.3. Обработка образцов методом ДУФ на используемом оборудовании на разных режимах.

2.4. Построение объемных профилограмм поверхностей обработанных образцов после ДУФ на оптическом профилометре.

2.5 Автоматизированный анализ фракционного состава диаметров отпечатков от дроби, после ДУФ по результатам построения объемной профилограммы поверхности с использованием разработанного программного обеспечения (ПО).

3. Построение КЭМ процесса ДУФ.

3.1. Построение конечно-элементной (КЭ) сетки и расчетной модели единичного внедрения дроби в материал детали с целью определения зависимости диаметра отпечатка от диаметра дроби и скорости при внедрении.

3.2. Построение КЭ сетки и расчетной модели множественного внедрения дроби в материал детали, с учетом разброса размеров применяемой дроби на основе входных данных – механических свойств, параметров распределения фракционного состава диаметров отпечатков от дроби, после ДУФ и размеров применяемой дроби.

3.3. Определение эпюр НН и деформаций на основе анализа результатов расчета КЭМ для различных режимов обработки и формирование соответствующих БД.

4. Моделирование процесса ДУФ расчётных участков (РУ) конструктивных элементов реальных деталей с приложением эквивалентной нагрузки путем внедрения эпюр НН и деформаций в целях получения зависимостей продольной и поперечной кривизны поверхности конструктивного элемента от режимных параметров процесса ДУФ.

5. Аппроксимация полученных в п. 4 зависимостей с применением подходов МО в целях прогнозирования режимных параметров процесса ДУФ для конкретных конструктивных элементов.

б. Установление характера взаимовлияния обрабатываемых конструктивных элементов в случае обработки сложных деталей, состоящих из совокупности конструктивных элементов.

2.2 Определение свойств материала для построения конечно-элементной модели процесса ДУФ

Испытания на растяжение образцов [11] проводились в целях определения следующих параметров, входящих в состав модели упруго-пластического материала с критерием текучести Мизеса-Хилла [88, 80], выбранную для проведения конечно-элементных расчетов:

- предел текучести: σ_T , МПа;
- модуль Юнга: E , ГПа;
- коэффициент Пуансона: μ .
- диаграмма зависимости напряжений от деформаций.

Указанные параметры определялись по методике работы [11].

В качестве образцов для проведения испытаний использовались образцы-пластины с размерами 250x30x4 мм, общий вид которой приведен на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Образец для проведения испытаний по определению механических свойств обрабатываемых деталей

Испытания проводились на универсальной испытательной машине ViSS UTM-100 kN (см. рисунок 2.2) [108], в следующей последовательности.

1. Образец зажимался при помощи гидравлических зажимов с одной стороны на неподвижном основании, а с другой – на подвижном штоке испытательной машины.



Рисунок 2.2 – Испытательная машина BiSS UTM-100 kN

2. Осуществлялось растяжение пластины путем перемещения штока со скоростью 2 мм/мин до разрушения образца. При этом записывалась сила при растяжении, получаемая с сила-моментного датчика и величина абсолютного перемещения и формируется массив данных, содержащий соответствующие зависимости.

3. Выполнялась обработка данных в программе Microsoft Excel, в целях получения диаграммы растяжения образца (см. рисунок 2.3).

4. Определялось среднеквадратичное отклонение (CO) между полученными параметрами механических свойств

$$CO = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2.1)$$

\bar{x} – среднее арифметическое последовательности;

x_i – текущее значение;

n – количество образцов.

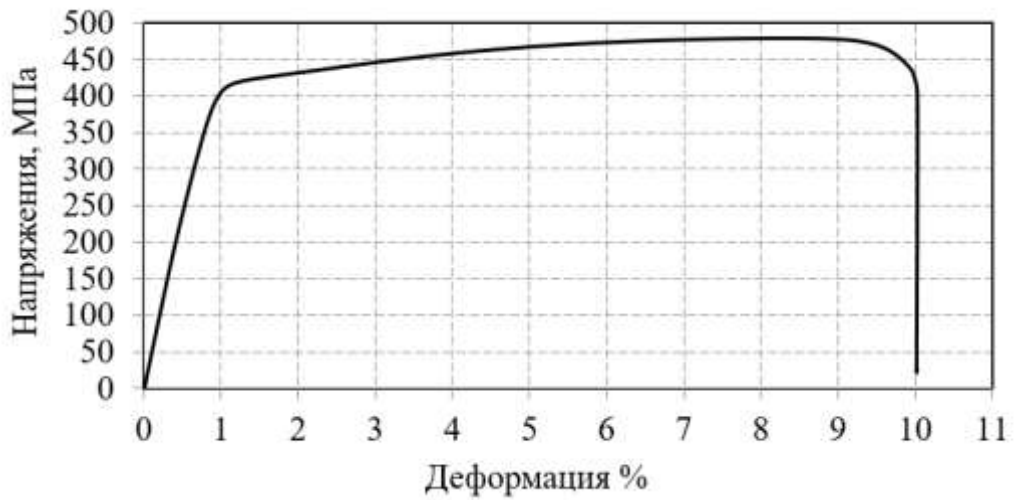


Рисунок 2.3 – Диаграмма растяжения материала В95пчТ2

4. Полученные результаты измерений и вычислений заносились в таблицу 2.1

Таблица 2.1 - Результаты определения свойств материала В95пчТ2 при разрыве пластины на испытательной машине

№	Сила растяжения, кН	Напряжение при разрушении, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Предел текучести, МПа	Коэф. Пуансона
1	56,7	478,6	49,8	421,3	0,31
2	60,8	506	49,8	436,8	0,3
3	60,4	510,2	49,9	453,0	0,31
4	58,8	492,7	49,8	435,2	0,3
5	59,6	501,5	49,9	445,1	0,29
СО	1,45	11,21	0,049	10,6	0,007
%	2,4	2,2	0,09	2,4	0,0017

Из таблицы 2.1 видно, для каждого измеряемого параметра СО от среднего значения составляет менее 3%, что свидетельствует о приемлемой повторяемости результатов исследования [73].

2.3 Определение параметров микрорельефа поверхности, обработанной при ДУФ

Входными параметрами для построения КЭМ процесса ДУФ, позволяющими определить интенсивность воздействия дробы и величину формируемых НН и деформаций являются:

- распределение фракционного состава дробы, применяемой при обработке, которое определялось экспериментально путем измерения партии дробы с использованием камеры с машинным зрением;

- распределение фракционного состава отпечатков дробы (микрорельефа обработанной поверхности) после операции ДУФ, которое определялось экспериментально, путем обработки образцов методом ДУФ с последующим измерением поверхности образцов на оптическом профилометре.

Методику определения фракционного состава дробы, применяемой при обработке, с использованием камеры с техническим зрением National Instruments Smart Camera 1764 (см. рисунок 2.4) [75] поясним на примере определения фракционного состава дробы диаметром $D = 3$ мм из материала ШХ 15 ГОСТ 3722-2014 [13].



Рисунок 2.4 – Общий вид камеры с техническим зрением National Instrument I Smart Camera 1764 и результат фотографирования изображений

Исследование выполнялось в следующей последовательности.

1. Осуществлялся отбор представительной пробы дробы весом 500 гр. с допустимой погрешностью ± 5 гр.
2. Проба дробы насыпалась на специальную пластину, на которой обозначены зоны сканирования и распределялась в один слой.
3. Пластины с дробью размещались на столе камеры с техническим зрением, осуществлялось фотографирование и сохранение изображений.
4. Производился анализ изображений в целях определения размеров дробинки с помощью программы Vision Assistant. Полученные изображения представляли собой двумерный массив значений функции интенсивности света. В ходе анализа полученных изображений осуществлялось разделение двумерного массива на отдельные пиксели с присвоением каждому из них цифровых координат, значений яркости или цветовых кодов. После этого проводилось вычисление координат расположения частиц и определение их площади в пикселях. На основании полученной площади изображений шариков в пикселях определялись их диаметры.

Таким образом, было определён фракционный состав – соотношение диаметров в общем количестве дробы:

$$D_1 = 2,9 \text{ мм} - 28\%;$$

$$D_2 = 3,0 \text{ мм} - 52\%;$$

$$D_3 = 3,1 \text{ мм} - 20\%.$$

Под параметрами микрорельефа обработанной поверхности будем подразумевать фракционный состав отпечатков – соотношение фракций диаметров отпечатков дроби в их общем количестве. Используем следующие обозначения

d_i – диаметр отпечатка i -ой фракции (номинальное значение);

Δd – заданное симметричное отклонение диаметров отпечатков фракций;

N_i – количество отпечатков i -ой фракции в диапазоне диаметров $d_i \pm \Delta d$.

В качестве образцов для определения фракционного состава диаметров отпечатков от дроби после ДУФ использовались образцы-пластины, эскиз которых приведен на рисунке 2.5.

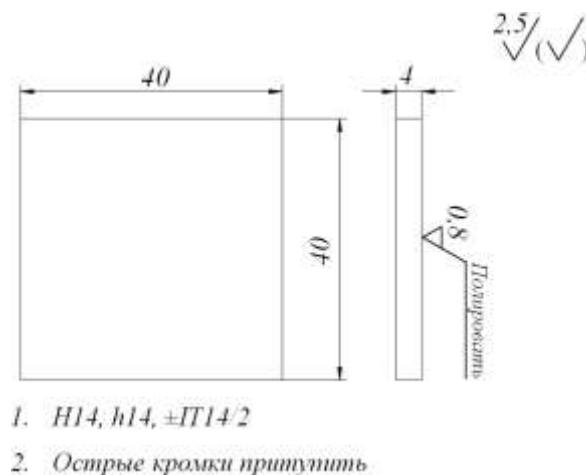
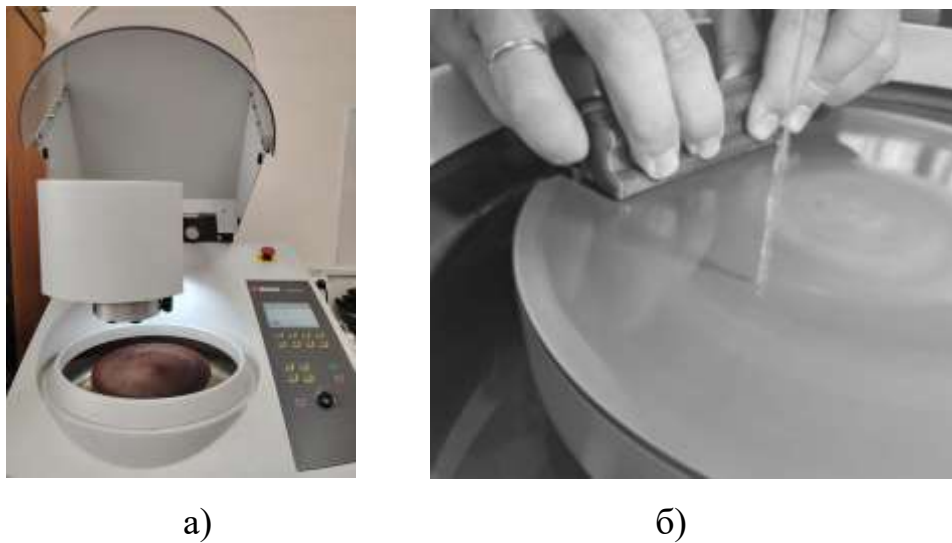


Рисунок 2.5 – Эскиз образцов для определения фракционного состава диаметров отпечатков от дроби, после ДУФ

Для повышения точности процесса построения объемной профилограммы обработанной поверхности на оптическом (интерференционном) профилометре требуется обеспечение шероховатости обработанной поверхности – не хуже $Ra0,8$ путем полирования поверхности образца до обработки дробью.

Образцы изготавливались фрезерованием из листового материала концевыми фрезами. После фрезерования шероховатость поверхности образцов

составляла $Ra\ 2,5$. При измерении на оптическом профилометре такой микрорельеф фрезерованной поверхности может вызвать искажение формы отпечатков от дроби. Для снижения исходного микрорельефа выполнялась обработка поверхности образцов на шлифовально-полировальном станке Struers Tegramin-25 (см. рисунок 2.6). Величина снимаемого припуска составляла 0,25 мм и контролировалась толщиномером [33].



а)

б)

а - общий вид станка; б - процесс обработки

Рисунок 2.6 – Обработка поверхности образцов на шлифовально-полировальном станке Struers Tegramin-25

После обработки на шлифовально-полировальном станке дополнительно проводились испытания по определению механических свойств материала, согласно п. 2.2. Полученные значения механических свойств материала: $\sigma_T = 506,32$; $E = 49,8$; $\mu = 0,3$) находились в пределах СО (см. таблицу 2.1).

Осуществлялось обработка дробью подготовленных образцов и выполнялось сканирование обработанной поверхности, размером 20x20 мм при помощи 3D-оптического профилометра Bruker Contour GT-K1 (см. рисунок 2.7). Данное оборудование позволяет выполнять 3D-сканирование области для получения профилограммы поверхности после обработки, однако для определения фракционного состава отпечатков от дроби на поверхности

детали достаточно плоского растрового изображения – вида сверху на полученную профилограмму.

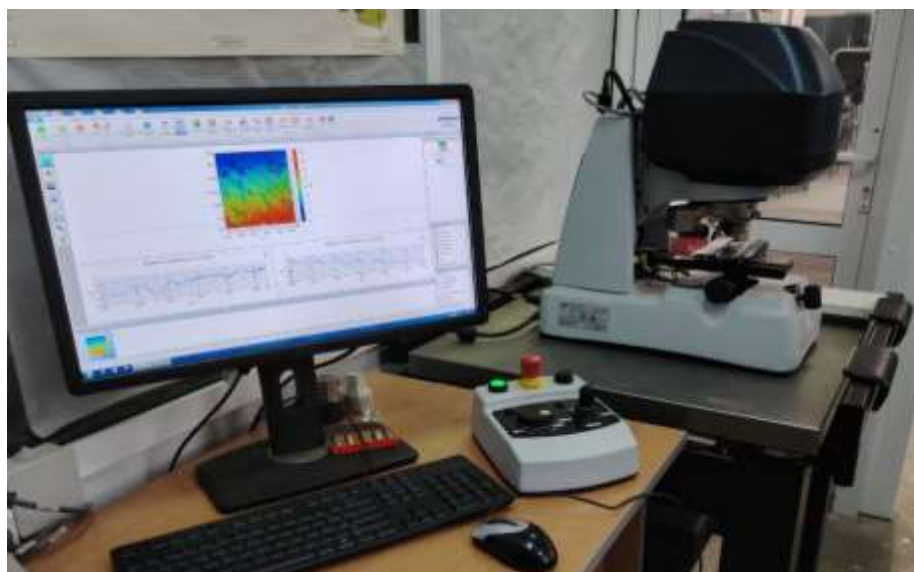


Рисунок 2.7 – 3D Сканирование при помощи оптического профилометра Bruker Contour GT-K1

Для анализа полученных изображений было разработано специализированное ПО на языке программирования Python, реализующее следующие функции (см. рисунок 2.8).

1. Предварительная обработка изображения, полученного с профилометра, в целях фильтрации от посторонних шумов (дефект снимка, проявляющийся при сканировании на профилометре из-за перепада высот в виде точек зернистости) и нежелательных объектов типа царапин.

2. Автоматизированное обнаружение отпечатков дроби на изображении с применением алгоритмов МО. Данная функция реализована следующим образом. Изображение разделяется на кластеры – группы объектов, объединённых по схожим характеристикам или принципам. Методы кластеризации объектов основаны на алгоритмах, которые определяют взаимное расположение объектов по различным характеристикам. После того как данные разделены на группы кластеров, необходимо оценить качество этого разделения с помощью метрик качества. В зависимости от выбранного метода

кластеризации применяются специфические метрики, которые основываются на особенностях алгоритма взаимного расположения объектов [41]. Для реализации поставленной задачи решено использовать статистические модели, из которых был выбран метод, основанный на Гауссовом распределении (Gaussian Mixture Models (GMM)) [122].

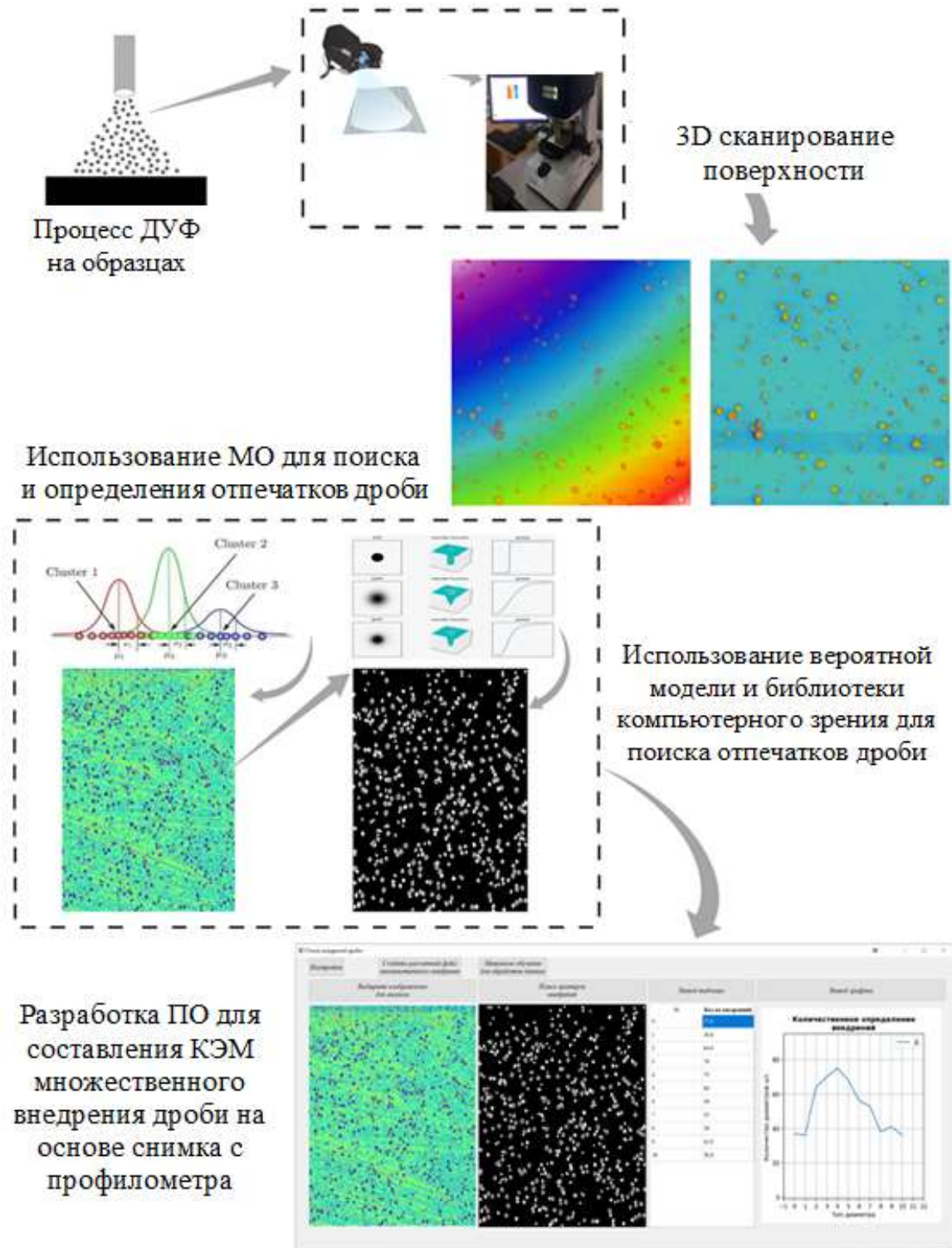


Рисунок 2.8 - Схема реализации автоматизированного поиска отпечатков

Модель гауссовой смеси – это вероятностная модель, в которой предполагается, что все точки данных генерируются из смеси конечного числа гауссовых распределений с неизвестными параметрами. Гауссово распределение используется для определения веса каждого пикселя при вычислении нового значения. Формула гауссова ядра выглядит следующим образом:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.2)$$

где: σ – стандартное отклонение (определяет степень размытия);

x, y - координаты относительно центра ядра.

Распределение в контексте кластеризации изображений представляет собой процесс разделения изображения на отдельные пиксели, при этом каждому пикселю присваивается вероятность принадлежности к определённому кластеру согласно формуле (2.2). После этого формируется новое изображение, где каждый кластер визуализируется отдельным цветом. Преимущества кластеризации по цвету способствуют более точному определению границ отпечатков, особенно в случаях, когда два или более отпечатков соединяются и не имеют четко выраженных границ. Для изображения, полученных снимков с профилометра, использовалось не более пяти групп кластеров, чтобы обеспечить оптимальное разделение и интерпретацию данных.

Изображение, разделенное на кластеры, использовалось для определения диаметров отпечатков от дроби методом компьютерного зрения, с использованием библиотеки OpenCV [124]. Результатами расчёта являются:

- выделение контуров группы кластеров, где присутствуют отпечатки от дроби, и с помощью алгоритмов МО выполняется обнаружение границ;
- аппроксимация формы отпечатков и определение минимального охватывающего эллипса или окружности для каждого кластера.
- расчёт геометрических параметров на основе аппроксимирующих фигур.

3. Формирование массива распределения диаметров отпечатков по фракциям и графическое отображение данных (см. рисунок 2.9). Интерфейс разработанного программного обеспечения представлен на рисунке 2.10.

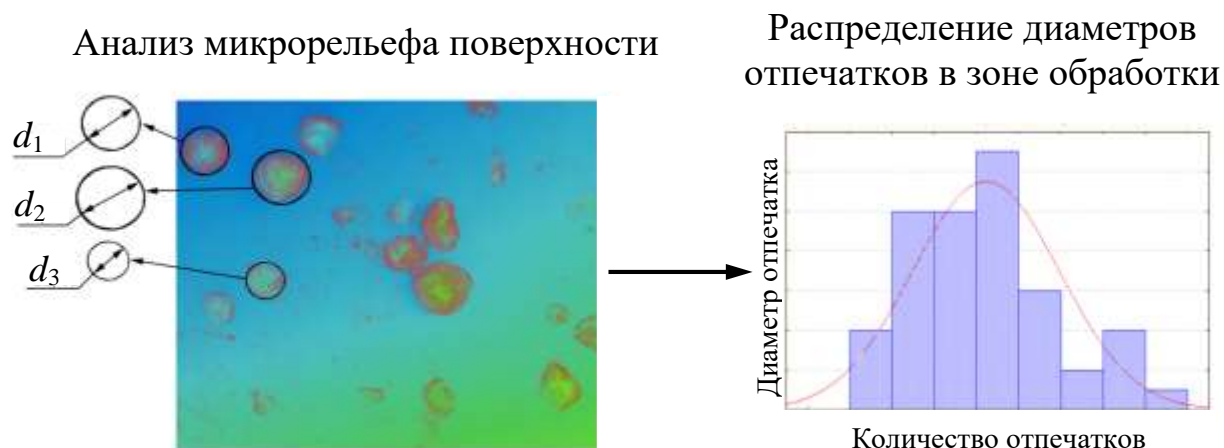
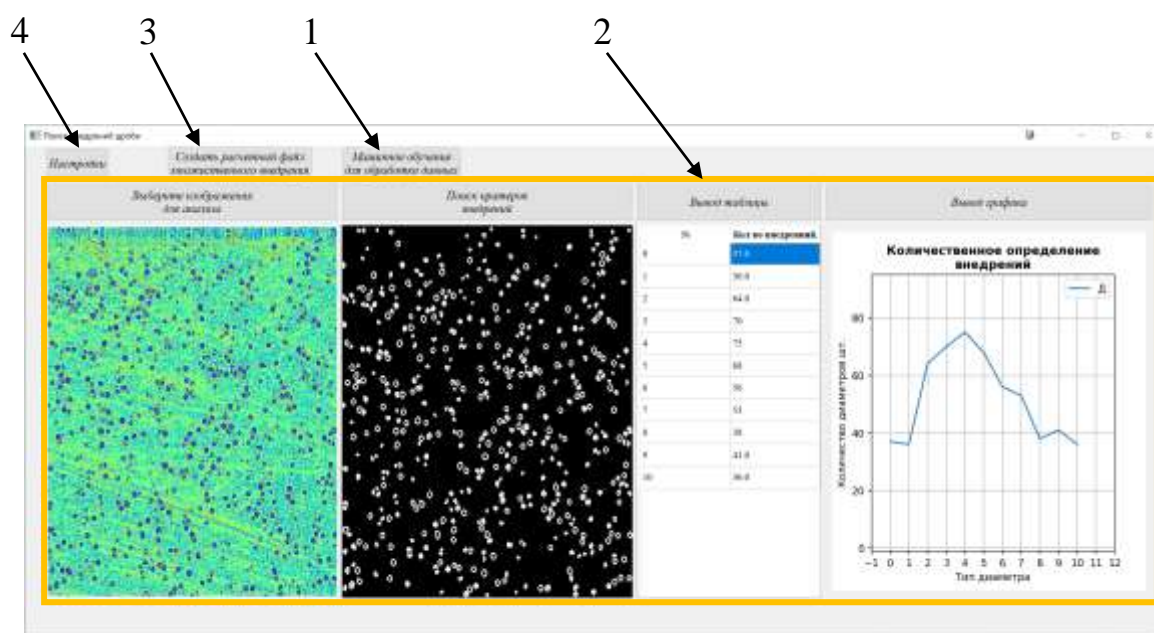


Рисунок 2.9 – Формирование массива распределения диаметров отпечатков от дробы по фракциям



- 1 – функция для кластеризации изображения; 2 – основное окно программы для визуализации обработки фотографического снимка;
- 3 – программа для генерации расчетной КЭМ; 4 – настройка параметров обработки изображения

Рисунок 2.10 – Интерфейс программы для автоматизированного определения микрорельефа обработанной дробью поверхности

2.4 Формирование базы исходных данных для расчёта эквивалентной нагрузки (ЭН) процесса ДУФ

Для расчёта ЭН процесса ДУФ необходимо установить соответствие между диаметрами и скоростями используемой дроби и диаметрами отпечатков в зоне обработки и сформировать соответствующую базу данных.

Методику формирования базы данных зависимостей диаметров отпечатков от скорости дроби различных диаметров на основе конечно-элементных расчетов по единичному внедрению сферического индентора в материал детали поясним, используя следующие переменные параметры: диаметр индентора $D = 2...5$ мм с интервалом 0,25 мм; скорость внедрения индентора $V = 3...15$ м/с с интервалом 3 м/с. Внедрение осуществлялось в параллелепипед с размерами $5 \times 5 \times 4$ мм. Размер единичного элемента сетки – $0,1 \times 0,1 \times 0,02$ мм.

В качестве решателя использовался программный продукт LS-DYNA Version R10 [45] со следующими основными параметрами модели:

- контакт между параллелепипедом и шариком задавался при помощи метода CONTACT_ENTITY, что обеспечивает создание бессеточной геометрии сферического объекта-индентора и взаимодействие с конечно-элементной сеткой параллелепипеда.

- модель материала – анизотропный упруго-пластический материал LS-DYNA MAT_ANISOTROPIC_VISCOPLASTIC, в которой упругие напряжения и деформации заданы по линейной зависимости:

$$\sigma = \varepsilon E$$

где: σ – напряжения; ε – деформация; E – модуль упругости.

В качестве критерия пластичности был применен критерий Мизеса-Хилла [61]. Определение механических свойств образца выполнялось на испытательной машине BiSS UTM-100 kN (см. раздел 2.2).

- модель материала шарика – жесткое тело MAT_RIGID материал предполагает, что объект не деформируется под воздействием нагрузок.

- определение связей осуществляется с помощью команды CONTACT_ENTITY, которая устанавливает контакт между пластиной и шариком в модели, а также задает координаты положения шарика относительно модели. Скорость шарика задается параметром INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY.

Результаты моделирования внедрения сферического индентора диаметром $D = 3$ мм, на скорости 3 м/с в виде распределения компоненты напряжений относительно оси X приведены на рисунке 2.11.

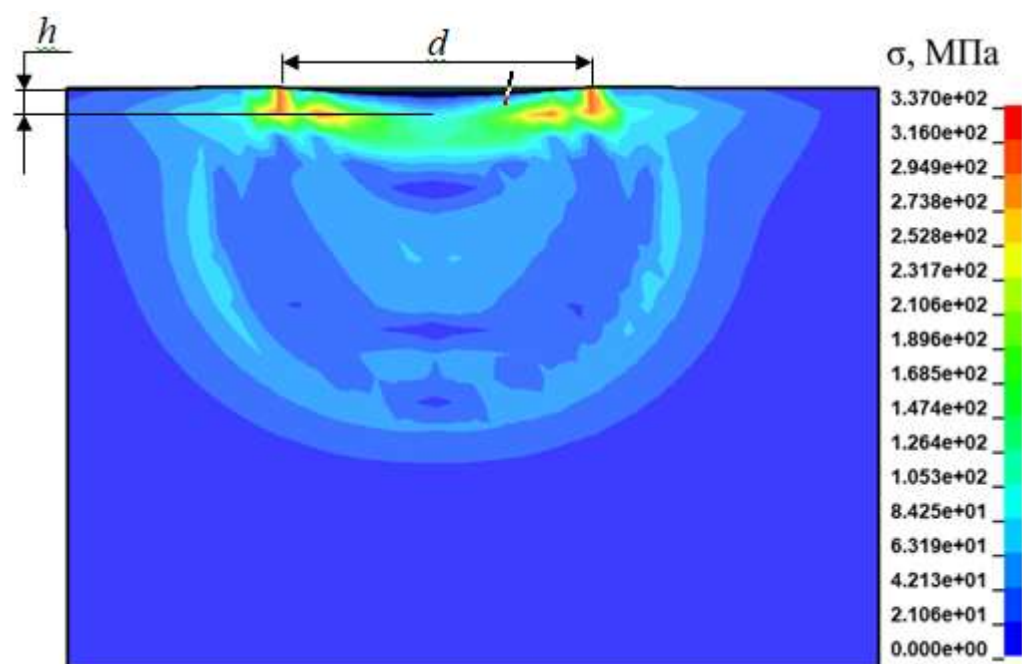


Рисунок 2.11 – Результаты моделирования внедрения единичного сферического индентора диаметром 3 мм со скоростью 3 м/с

После проведения расчетов была сформирована база данных выходных параметров – диаметра (d , мм) и глубины (h , мм) отпечатка (см. приложение А), построены графики зависимости диаметров отпечатков от скорости внедрения инденторов (см. рисунок 2.12) и определены соответствующие аппроксимирующие функции в виде полиномов второго порядка.

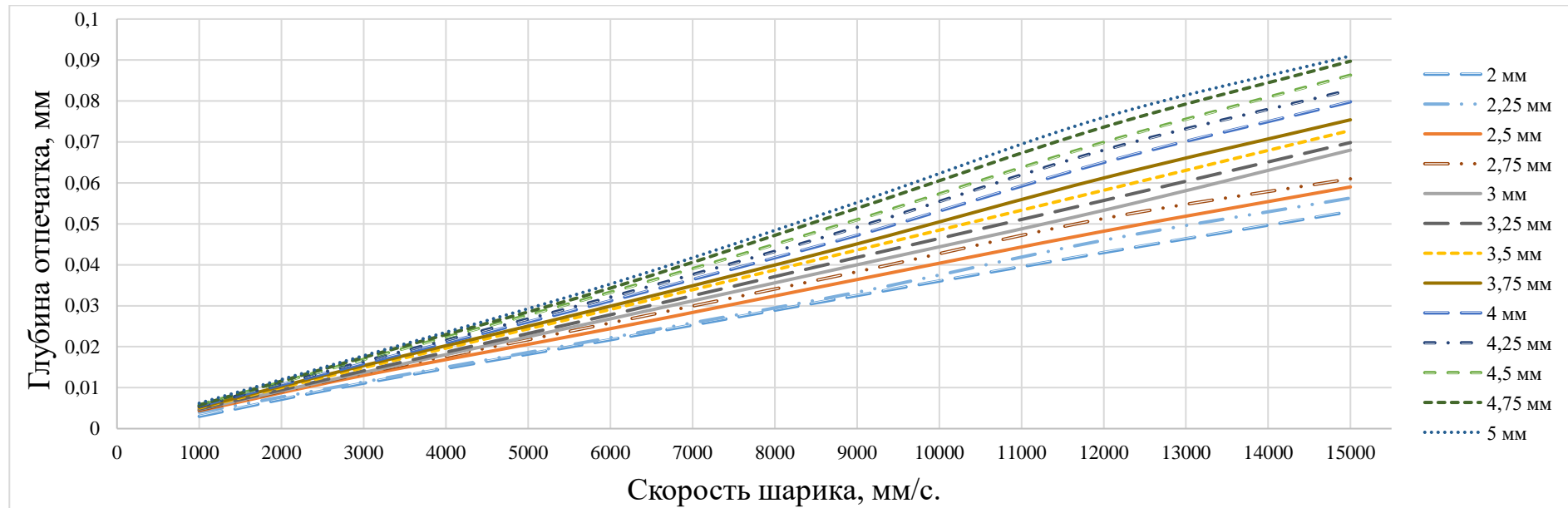
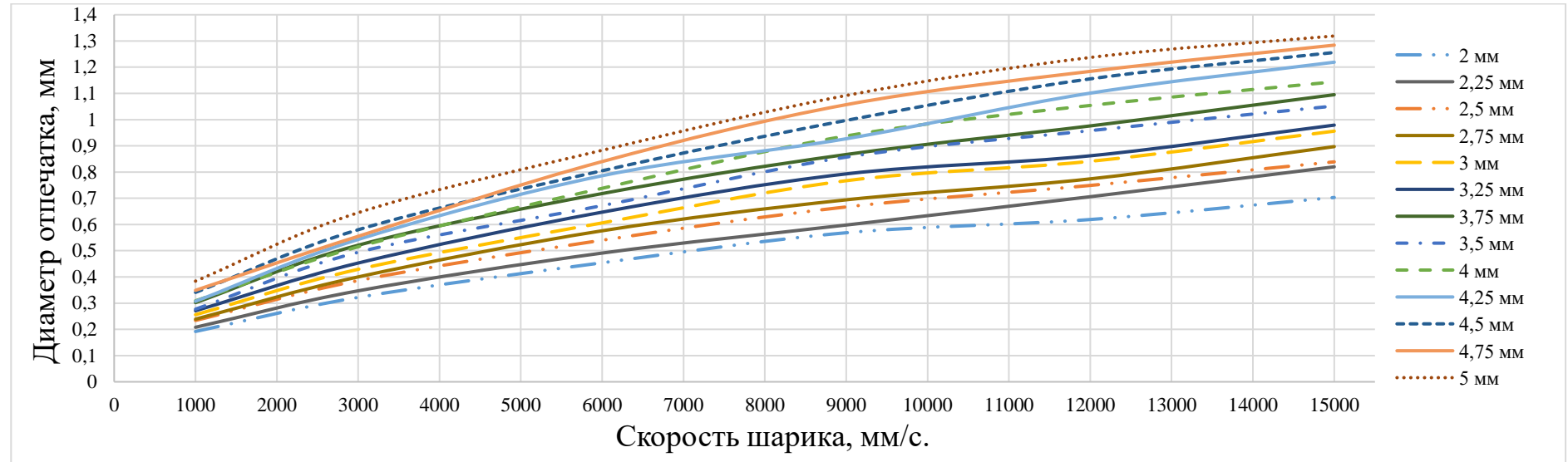


Рисунок 2.12 – Результаты моделирования единичного отпечатка дроби с разной скоростью

Ниже приведены функции, аппроксимирующие зависимости диаметра отпечатка от скорости внедрения сферического индентора $d^{(D=x)} = F(v)$, где, d – диаметр отпечатка; x – диаметр индентора в мм; v – скорость внедрения.

$$\begin{aligned}
 d^{(D=2)} &= -4 \cdot 10^{-9} \cdot v^2 + 0,0001 \cdot v + 0,2801; \\
 d^{(D=2,25)} &= -4E-09 \cdot v^2 + 0,0001 \cdot v + 0,2261; \\
 d^{(D=2,5)} &= -3E-09 \cdot v^2 + 0,0001 \cdot v + 0,2497; \\
 d^{(D=2,75)} &= -3E-09 \cdot v^2 + 0,0001 \cdot v + 0,2271; \\
 d^{(D=3)} &= -3E-09 \cdot v^2 + 0,0001 \cdot v + 0,2106; \\
 d^{(D=3,25)} &= -2E-09 \cdot v^2 + 9E-05 \cdot v + 0,2338; \\
 d^{(D=3,5)} &= -3E-09 \cdot v^2 + 1E-04 \cdot v + 0,2; \\
 d^{(D=3,75)} &= -2E-09 \cdot v^2 + 9E-05 \cdot v + 0,2007; \\
 d^{(D=4)} &= -2E-09 \cdot v^2 + 8E-05 \cdot v + 0,1871; \\
 d^{(D=4,25)} &= -2E-09 \cdot v^2 + 7E-05 \cdot v + 0,1833; \\
 d^{(D=4,5)} &= -2E-09 \cdot v^2 + 7E-05 \cdot v + 0,1759; \\
 d^{(D=4,75)} &= -1E-09 \cdot v^2 + 6E-05 \cdot v + 0,1645; \\
 d^{(D=5)} &= -2E-09 \cdot v^2 + 6E-05 \cdot v + 0,1416.
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

С использованием полученного массива значений функции $d^{(D=x)} = F(v)$ (формулы 2.3) в заданном диапазоне скоростей и диаметров дроби можно методом интерполяции получить промежуточные значения скоростей дроби известного фракционного состава для найденного фракционного состава диаметров отпечатков.

Выполнив преобразования, получим зависимости скорости дроби от диаметров отпечатков для ранее определённого фракционного состава дроби диаметром $D = 3$ мм (см. раздел 2.3).

$$v^{(D=2,9)} = 17508 d^2 + 411,74 d - 325,73;$$

$$v^{(D=3,0)} = 16940 d^2 + 92,344 d - 250,5; \quad (2.4)$$

$$v^{(D=3,1)} = 16397 d^2 + 202,16 d - 177,42.$$

Ввиду того что отпечаток одного и того же диаметра d может быть сформирован дробью, диаметром D_1 , внедряемой в деталь со скоростью v_1 , дробью диаметром D_2 , внедряемой в деталь со скоростью v_2 и т.д., целесообразно принять допущение о распределении количества инденторов согласно фракционному составу применяемой дроби.

Таким образом, согласно данным полученным в разделе 2.3, в общем количестве N_i отпечатков i -ой фракции будет иметь место следующее распределение скоростей дроби, определяемых по формулам (2.4):

$$- v^{(D=2,9)}: N_i^{(D=2,9)} = 0,28 N_i ;$$

$$- v^{(D=3,0)}: N_i^{(D=3,0)} = 0,52 N_i ;$$

$$- v^{(D=3,1)}: N_i^{(D=3,1)} = 0,20 N_i .$$

2.5 Автоматизация конечно-элементного моделирования процесса множественного внедрения дроби при ДУФ

Разработанный программный модуль, описанный в разделе 2.4, позволяет создавать расчетный файл, предназначенный для конечно-элементного моделирования процесса множественного внедрения сферической дроби в САЕ системе со случайной генерацией координат центров дроби и учетом фракционных составов дроби и её отпечатков на обработанной поверхности. Блок схема работы ПО для автоматического создания данного файла приведена на рисунке 2.13.



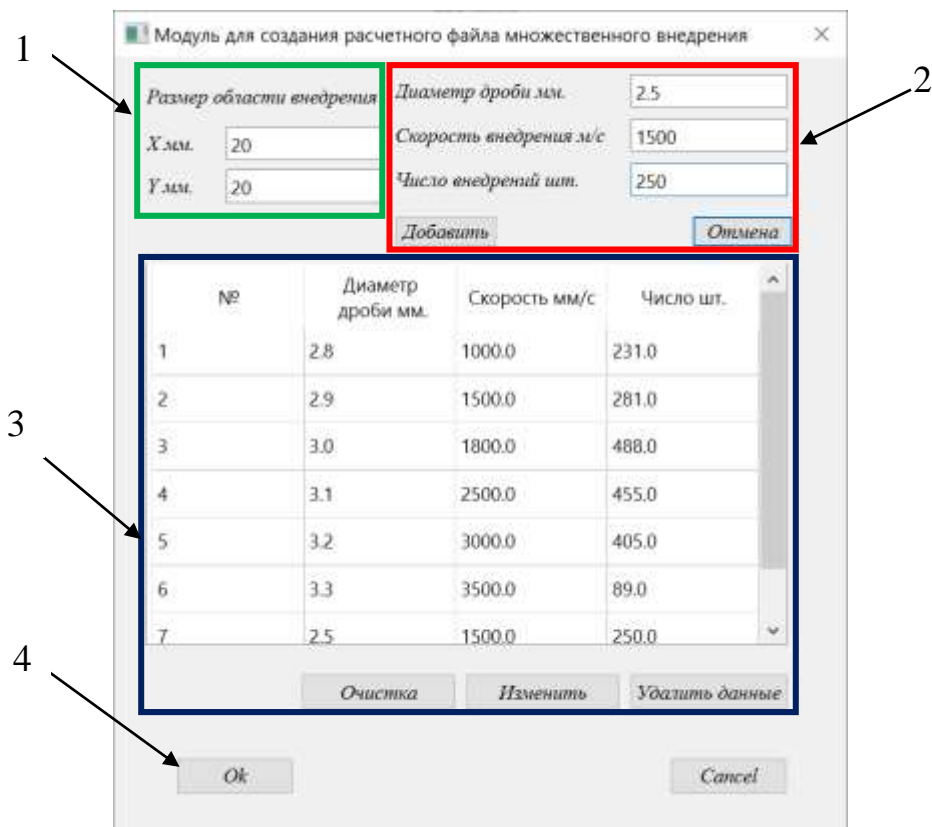
Рисунок 2.13 – Блок схема работы ПО для автоматического создания расчетного файла множественного внедрения

Для создания программного модуля использовался язык программирования Python с применением следующих библиотек, позволяющих, при необходимости, выполнять анализ и коррекцию данных:

- pandas – для обработки и анализа данных;

- sqlalchemy – для работы с БД, на основе языка запросов SQL;
- numpy – для работы с математическими вычислениями;
- matplotlib – для визуализации данных и построения графиков и таблиц.

Интерфейс ПО для автоматического создания расчетного файла множественного внедрения приведен на рисунке 2.14. Листинг программного кода приведен в приложении Е.



1) определение размеров области внедрения дроби; 2) задание параметров одного типоразмера дроби; 3) сводная таблица содержащая заданные параметры для каждого типоразмера дроби; 4) кнопка для создания выходного файла

Рисунок 2.14 – Интерфейс ПО для автоматического создания расчетного файла множественного внедрения

Входными данными для создания расчетной модели служат:

- размеры области внедрения дроби над поверхностью детали, в которой осуществляется случайная генерация координат центров инденторов согласно

закону равномерного распределения случайных величин. При указании области внедрения создается модель пластины с размерами конечно-элементной сетки $1,00 \times 1,00 \times 0,10$ мм;

- соотношение фракций применяемой дроби и скоростей при внедрении, рассчитанной согласно данным, полученным в результате функционирования программного обеспечения, основанного на МО;

Программное обеспечение позволяет автоматически назначить контакт детали и индентора, создать закрепление (см. рисунок 2.15), настроить время и параметры расчета.

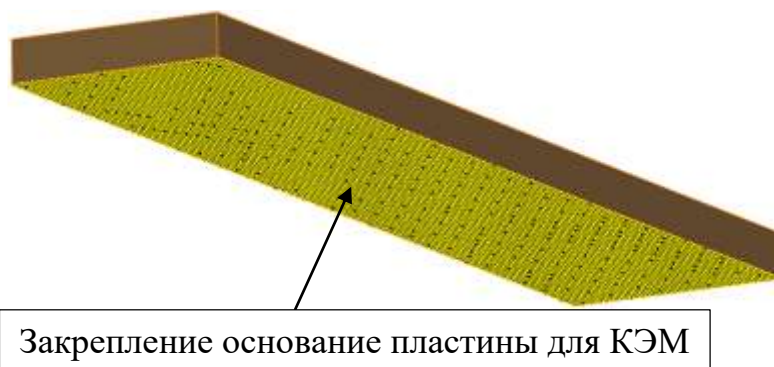


Рисунок 2.15 – Схема закрепления детали в процессе обработки

После множественного внедрения закрепление в пластине автоматически снимается для оценки пластических деформаций и определения кривизны пластины. Для этого необходимо минимизировать эффект упругого пружинения детали после снятия закрепления. В ANSYS LS-DYNA имеется механизм DAMPING для рассеивания энергии в конечно-элементном анализе, который используется для уменьшения или подавления колебаний [45]. Для уменьшения колебаний использовались функции DAMPING FREQUENCY RANGE и DAMPING GLOBAL (см. рисунок 2.16).

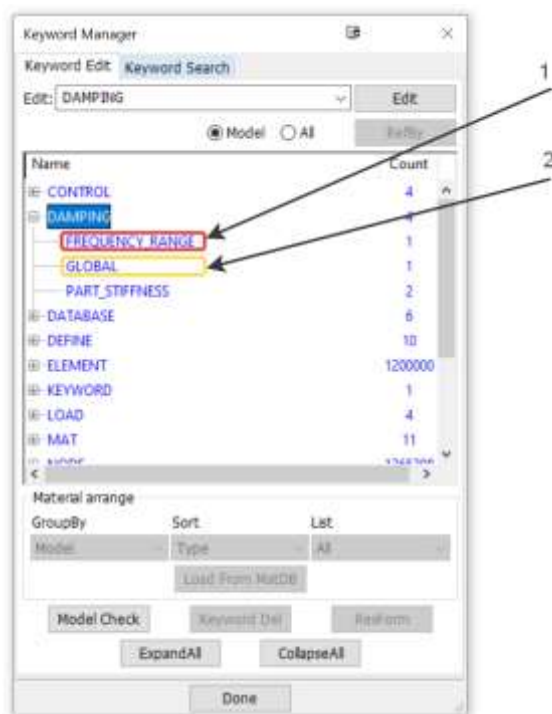


Рисунок 2.16 – Функции демпфирования ANSYS LS-DYNA

Damping global – определяет узловое демпфирование, взвешенное по массе, которое применяется к узлам деформируемого тела или к центру масс твердого тела [136]

$$D_s = 2\omega_{\min}\zeta,$$

где: D_s – константа демпфирования;

ζ – коэффициент демпфирования;

ω_{\min} – угловая частота,

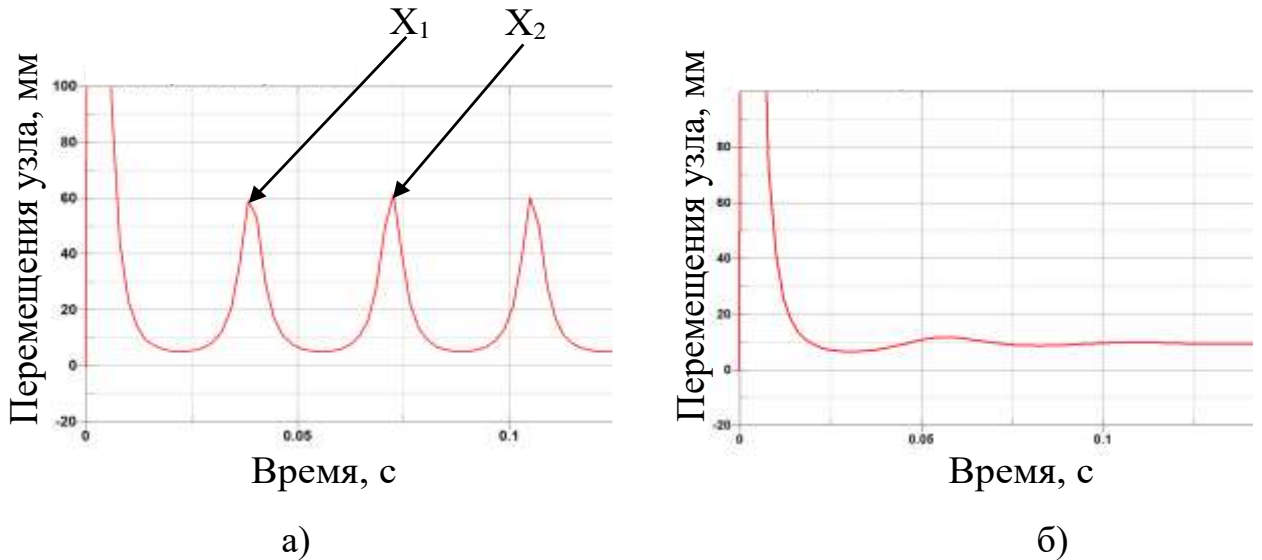
$$\omega_{\min} = 2\pi f_{\min}.$$

Функция DAMPING FREQUENCY RANGE предполагает постоянный коэффициент демпфирования ϑ в требуемом диапазоне частот

$$\vartheta = \frac{\ln \frac{X_1}{X_2}}{\sqrt{4\pi^2 + (\ln \frac{X_1}{X_2})^2}},$$

где: X_1 и X_2 – первая и следующая амплитуда колебания узлов конечно-элементной сетки соответственно. Использование этого параметра напрямую связано с изменением жесткости материала.

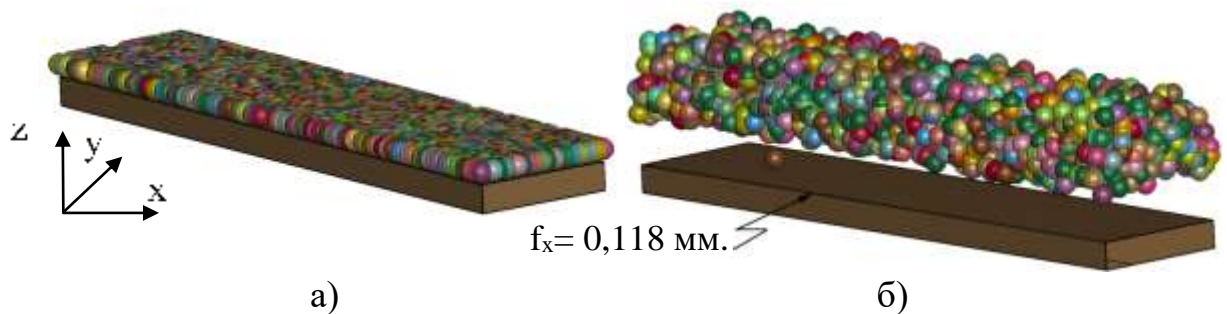
На рисунке 2.17 приведены графики зависимости амплитуды колебаний от времени для одного из узлов конечно-элементной сетки детали с размерами 200x20x4 мм после множественного внедрения и снятия закрепления.



а - без демпфирования; б - при сконфигурированной функции демпфирования

Рисунок 2.17 – Графики зависимости амплитуды колебаний от времени для одного из узлов конечно-элементной сетки детали с размерами 200x20x4

Таким образом, разработанный программный модуль, позволяет на основе полученных данных о степени покрытия сформировать расчетный файл КЭМ (см. рисунок 2.18).



а - до внедрения дроби; б - после внедрения дроби и оценка стрелы прогиба полотна

Рисунок 2.18 – Расчетная модель множественного внедрения

Результатами расчета являются распределения:

- компонент начальных напряжений и деформаций, формируемых в поверхностном слое после внедрения и отскока дроби, до снятия закрепления с детали;

- компонент остаточных напряжений и деформаций, формируемых в поверхностном слое после внедрения и отскока дроби и снятия закрепления с детали;

- определение стрелы прогиба после снятия закрепления детали;

- графики распределения НН и деформаций по толщине детали (см. рисунок 2.19).

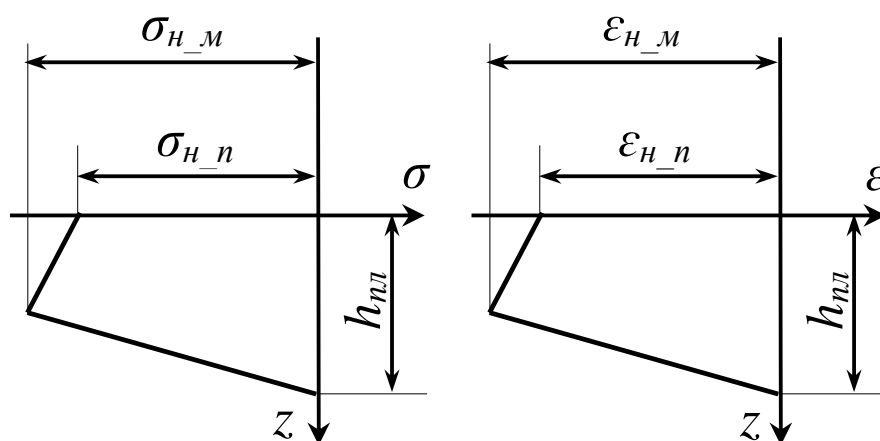


Рисунок 2.19 – Схемы распределения начальных напряжений и деформаций по толщине детали в виде схематических обозначений

Исходя из полученных распределений определяются следующие параметры:

$\sigma_{н_п}$ – величина поверхностных НН;

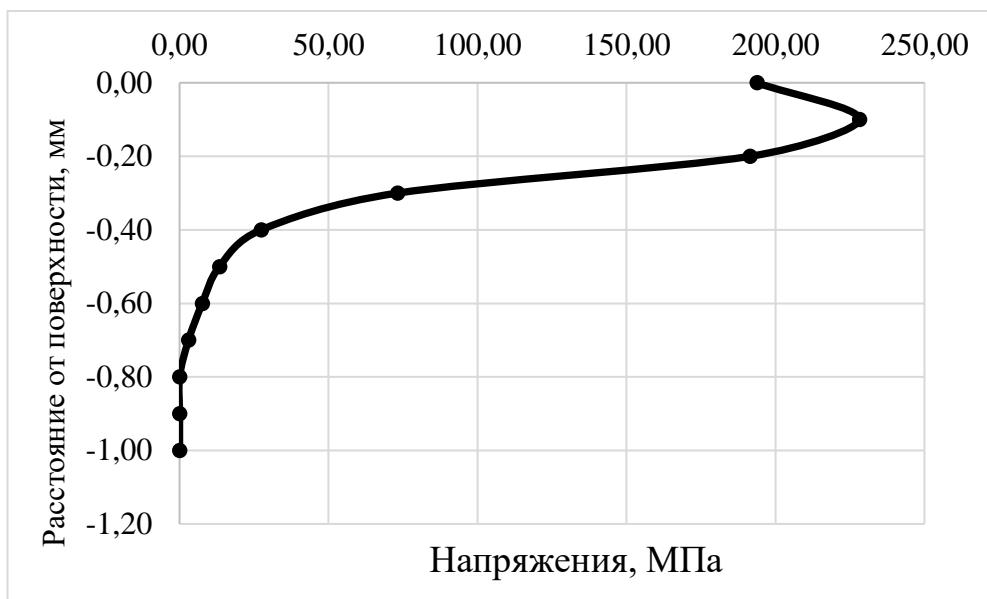
$\sigma_{н_м}$ – величина максимальных НН (напряжения подслоного максимума);

$h_{пл}$ – глубина залегания НН и деформаций;

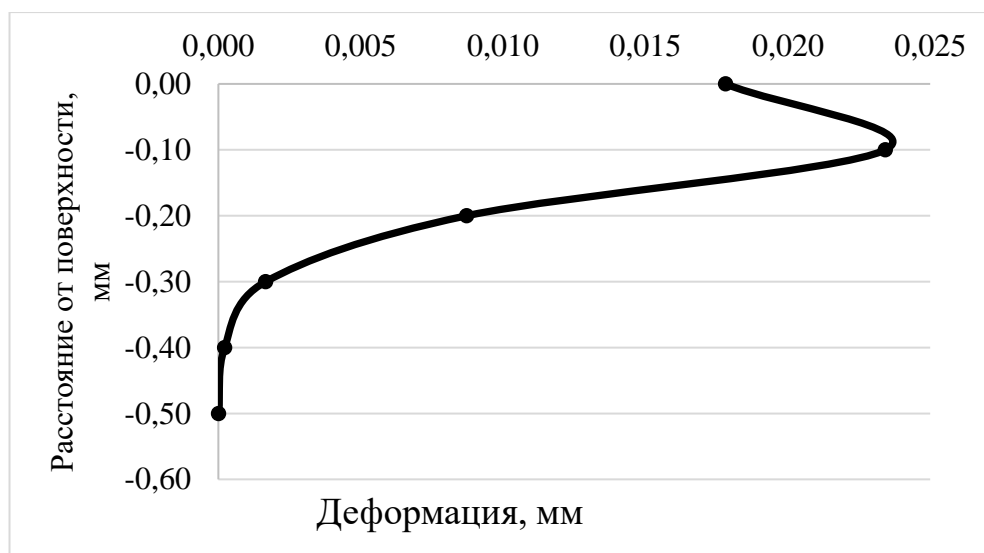
$\varepsilon_{н_п}$ – величина поверхностных пластических деформаций (интенсивность деформаций по Мизесу);

$\varepsilon_{н_м}$ – величина максимальных пластических деформаций (интенсивность деформаций по Мизесу);

При помощи программного модуля, осуществляется формирование массива данных распределений НН (см. рисунок 2.20а) и деформаций (см. рисунок 2.20б), возникающих в процессе ДУФ.



а)



б)

а - начальных напряжений; б - относительной деформации

Рисунок 2.20 – Графики зависимости от режимного параметра ДУФ (времени обработки)

Распределения НН и деформаций, полученные конечно-элементным моделированием множественного внедрения дроби при ДУФ с увеличением времени обработки приведены в приложении Б.

Полученные распределения позволяют перейти к моделированию процесса ДУФ при помощи новой методики, использующей подход внедрения в поверхностный слой НН и деформаций в качестве эквивалентной нагрузки.

2.6 Конечно-элементное моделирование процесса ДУФ конструктивных элементов деталей с использованием начальных напряжений и деформаций в качестве ЭН

Существующие подходы по моделированию процесса ДУФ применительно к расчётным участкам (РУ) в виде конструктивных элементов деталей используют подход, связанный с определением эквивалентной растягивающей силы, приложенной на некоторой глубине от поверхности детали [36, 53, 56]. Данная сила определяется при помощи разделения эпюры остаточных напряжений на начальные – вызванные воздействием потока дроби на поверхность детали и реактивные – связанные с упругим откликом детали в виде удлинения и изгиба. Интегрирование эпюры НН позволяет определить величину искомой силы.

Однако данный подход определения силы достаточно трудоемкий и как уже отмечалось ранее, не лишен ряда недостатков: невозможно моделировать ДУФ деталей больших размеров и получать переменную кривизну. В связи с этим была предложена методика моделирования процесса ДУФ РУ в виде пластины, не имеющей возможности упругой разгрузки (удлинения и изгиба) после обработки дробью. В результате моделирования можно сразу получать эпюры распределения НН и деформаций, и использовать их в качестве ЭН, позволяющей определить формоизменение образца в зависимости от режимных параметров процесса. Моделирование выполняется в среде ANSYS LS-Dyna или аналогах в следующей последовательности:

1. При помощи программного модуля, описанного в разделе 2.5, формируется массив данных распределений НН и деформаций, возникающих в процессе ДУФ на разных режимах обработки.

2. Выполняется подготовка КЭМ РУ в виде единичного конструктивного элемента или совокупности конструктивных элементов детали.

В случае если деталь характеризуется постоянной кривизной и геометрическими параметрами по всей протяженности, то ее можно рассматривать как цельную, не разбивая на совокупность РУ. В другом случае – осуществляется разделение на РУ, таким образом, чтобы кривизна и геометрические параметры РУ имели разброс не более 10-15%. Далее модель каждого РУ разбивается на сетку конечных элементов (см. рисунок 2.21).

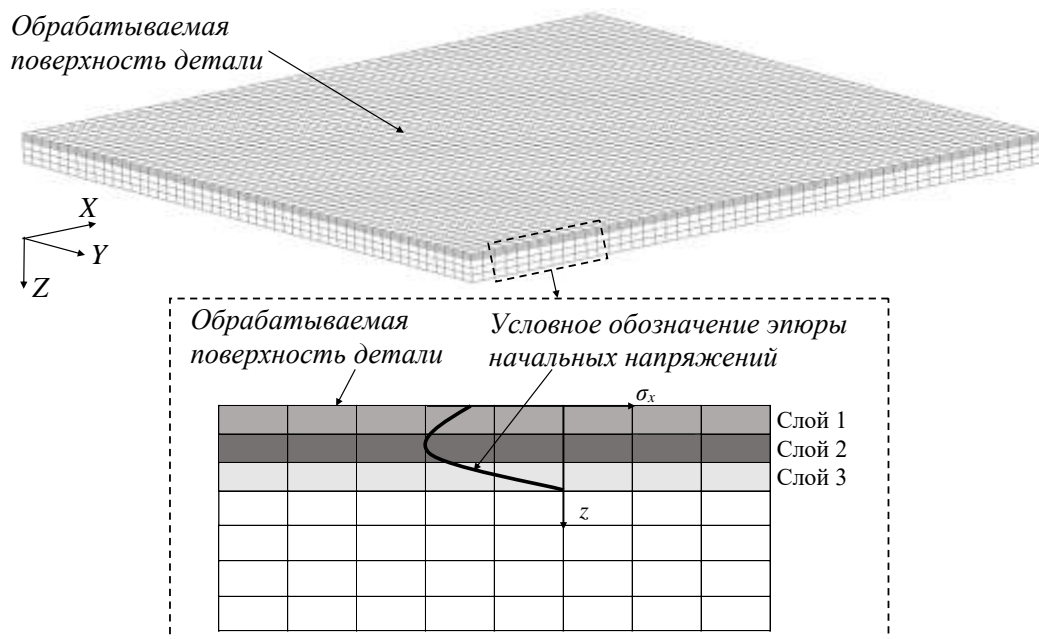


Рисунок 2.21 – Схема подготовки сетки конечных элементов детали для внедрения НН и деформаций

Со стороны обрабатываемой поверхности детали формируются 3 слоя сетки КЭ по координате Z , толщиной равной глубине $h_{нл}$ эпюры НН. В данные слои осуществляется внедрение НН и деформаций (см. рисунок 2.19):

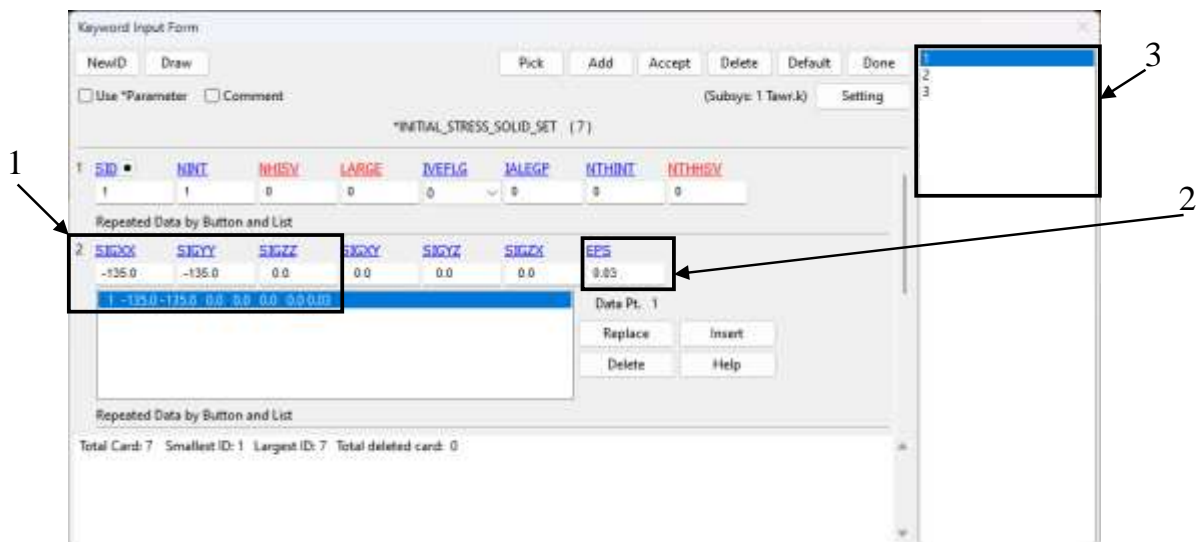
- слой 1 – величина поверхностных напряжений σ_{n_n} и деформаций ε_{n_n} ;
- слой 2 – величина максимальных напряжений σ_{n_m} и деформаций ε_{n_m} ;
- слой 3 – свободный от напряжений и деформаций, в котором осуществляется автоматический переход от максимальных напряжений и деформаций к нулевым, исходно недеформируемым элементам сетки.

При этом размеры сетки элементов по координатам X и Y должны удовлетворять следующему выражению:

$$n_{x,y} = 8 \cdot n_z,$$

где: $n_{x,y}$ – размеры элементов относительно координат X и Y .

3. При помощи функций ANSYS LS-Dyna INITIAL_STRESS_SOLID_SET (см. рисунок 2.22), для каждого слоя задается значение НН и деформаций. Параметры SIGXX и SIGYY отвечают за компоненты НН относительно оси X и Y соответственно. Параметр EPS отвечает за величину интенсивности деформаций [25, 43, 107]. На рисунке 2.23 приведена КЭ модель пластины с внедренными НН и деформацией.



1 – установка напряжений в слое; 2 – определение деформации в слое;

3 – количество слоев

Рисунок 2.22 – Параметры настройки INITIAL_STRESS_SOLID_SET

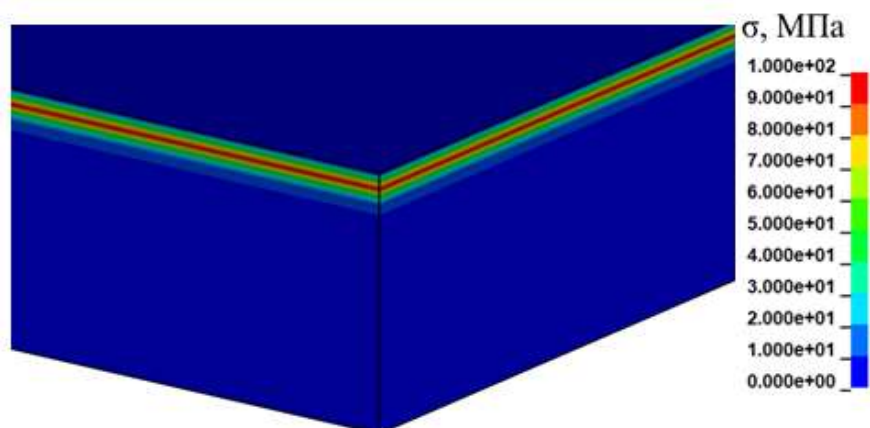


Рисунок 2.23 – КЭМ детали с внедренными компонентами напряжений и деформаций

4. После выполнения расчета осуществляется определение стрел прогиба f_x и f_y на базе 200 мм на РУ в двух направлениях: по нормали к поверхности детали и параллельно плоскостям ZOX и ZOY соответственно (см. рисунок 2.24).

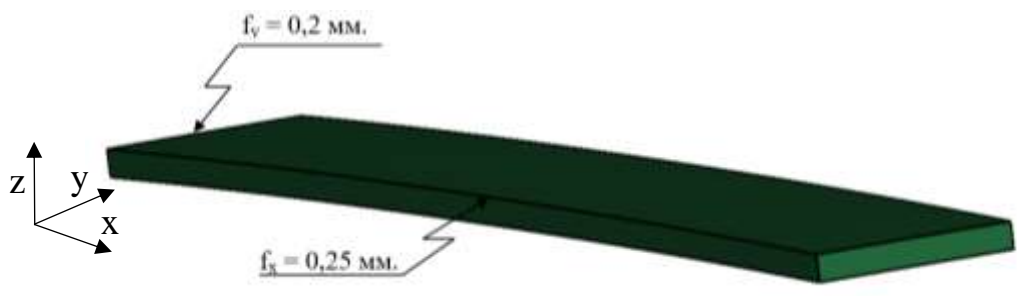


Рисунок 2.24 – Определение стрелы прогиба в двух направлениях относительно осей X и Y

5. Расчет повторяется для других режимных параметров ДУФ и выполняется построение графика зависимости стрелы прогиба РУ от режимного параметра обработки. Для анализа распределения кривизны в процессе моделирования использовалась формула (2.1). Как видно на рисунке 2.25, значение СО прогиба для режимного параметра обработки не превышает 0,04 мм.

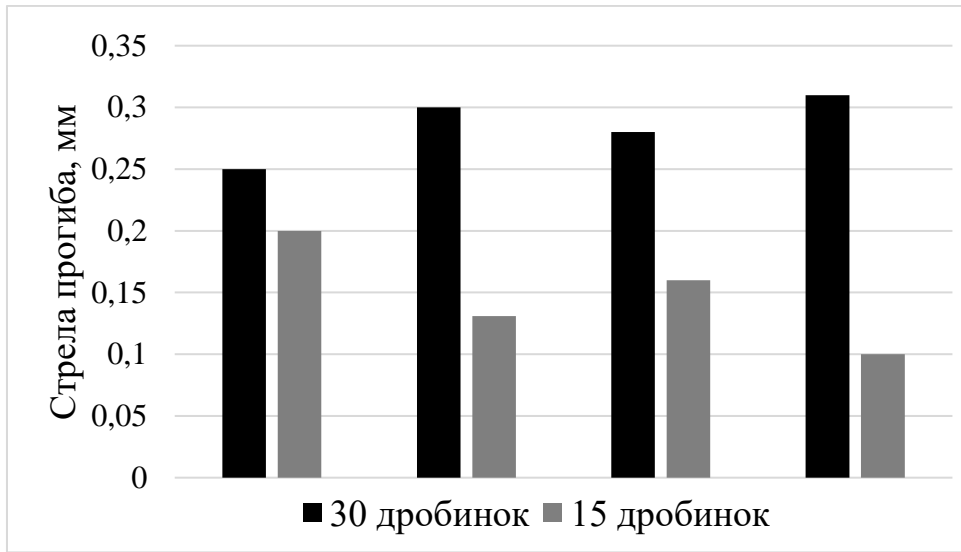


Рисунок 2.25 – График зависимости стрелы прогиба от количества дроби

Таким образом, осуществляется моделирование процесса ДУФ РУ деталей конечных размеров с использованием НН и деформаций в качестве ЭН и формирование массива данных, связывающих размерные параметры РУ с значениями формируемой стрелы прогиба.

По сравнению с известным методом приложения расчетной силы, данный подход гораздо менее трудоемкий и позволяет моделировать ДУФ реальных деталей больших размеров с переменной кривизной, представляемых в виде совокупности РУ, обрабатываемых с неизменными режимами.

Выводы по главе 2

1. Решён комплекс вопросов, направленных на совершенствование методики расчёта эквивалентной нагрузки (ЭН) – интегральной характеристики воздействия потока дроби на деталь в виде распределений начальных напряжений (НН) и деформации в поверхностном слое. Использование ЭН при конечно-элементном моделировании (КЭМ) процесса дробеударного формообразования (ДУФ) позволяет определить формоизменение реальных обводообразующих деталей, представляющих совокупность расчётных участков (РУ) с переменными геометрическими параметрами.

2. Повышение адекватности расчёта ЭН достигнуто за счёт учёта фракционного состава дроби и параметров микрорельефа обработанной поверхности (фракционный состав диаметров отпечатков дроби), связанных с режимами ДУФ и особенностями потока дроби, создаваемого технологическим оборудованием. Анализ микрорельефа выполнен на основе объёмных изображений, полученных с применением высокоточного 3D-оптического профилометра.

3. Для сокращения времени обработки данных при определении параметров микрорельефа, ранее осуществлявшимся методом ручной обводки отпечатков в графическом редакторе, разработан способ автоматизированного анализа изображений, представляющих совокупность пикселей разного цвета. Для разделения пикселей изображения на кластеры по цвету разработано программное обеспечение (ПО), где использовано машинное обучение (МО) на основе модели гауссовых смесей и библиотеки OpenCV компьютерного зрения. Для установления соотношения между количеством пикселей и размерами отпечатков сформирована база данных (БД), учитывающая разрешения изображений.

4. Предложена методика расчёта ЭН методом КЭМ процесса множественного внедрения дроби в закреплённую пластину с автоматической

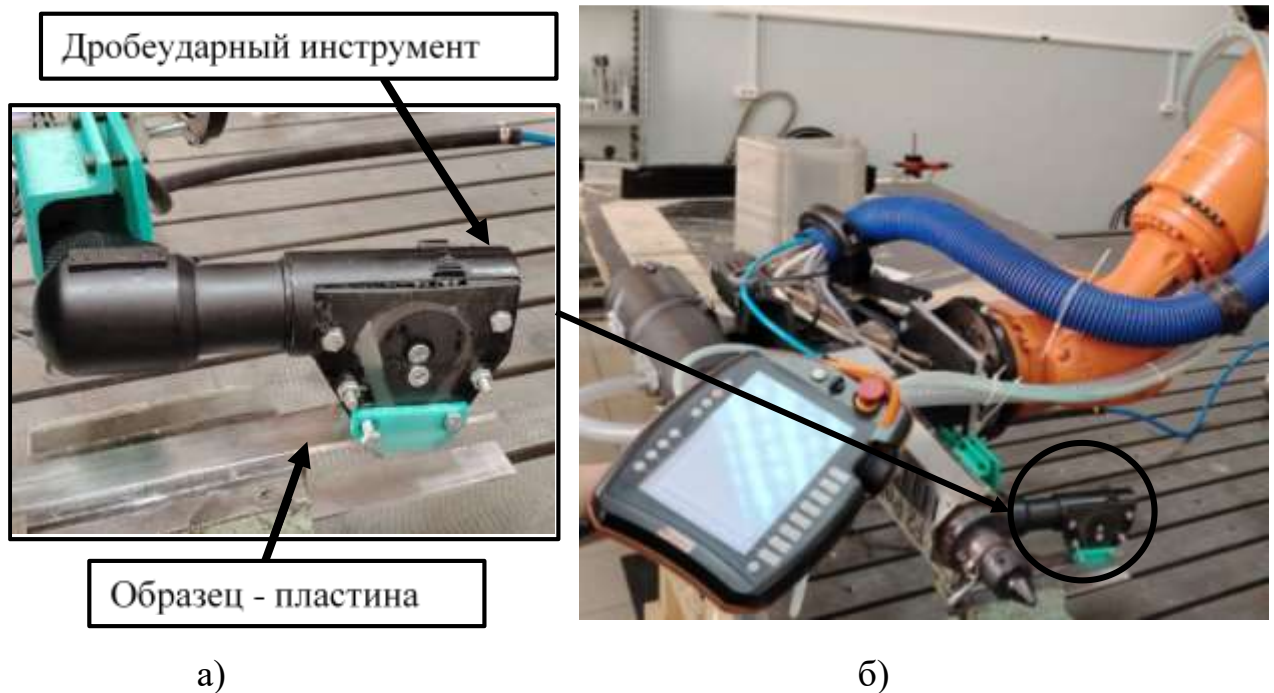
подготовкой расчетного файла со случайной генерацией координат и скоростей соударения на основе известных режимов обработки, параметров фракционного состава дроби и микрорельефа обработанной поверхности. Для выполнения расчётов сформирована БД в виде совокупности полиномиальных зависимостей диаметра и глубины отпечатков от скорости дроби рабочего диапазона, полученных путём КЭМ процессов единичных внедрений дроби в материал детали.

5. Предложена и протестирована на расчётных участках (РУ) в виде конструктивных элементов деталей методика КЭМ процесса ДУФ деталей конечных размеров с использованием в качестве ЭН эпюр НН и деформаций, внедряемых в поверхностный слой детали. Методика позволяет добиться значительной экономии вычислительных ресурсов и повышения адекватности расчётов за счёт исключения принятия допущений, связанных с определением сосредоточенной силы и координаты точки её приложения. При этом появляется возможность моделировать процесс ДУФ реальных деталей с переменными геометрическими параметрами, представляемых в виде совокупности РУ, обрабатываемых с неизменными режимами.

3. Исследование технологического процесса ДУФ деталей типа оребрѐнных панелей

3.1 Экспериментальное исследование по автоматизированному определению параметров микрорельефа поверхности отпечатками дроби после ДУФ

Для проверки адекватности методики автоматизированного определения параметров микрорельефа поверхности после ДУФ отпечатками дроби была проведена обработка дробию образцов, размерами $40 \times 40 \times 4$ мм, с шероховатостью обрабатываемой поверхности $Ra0,8$ с использованием инструмента для пневмодинамической обработки дробию, закрепленного на фланце робота-манипулятора для обеспечения стабильной скорости подачи (см. рисунок 3.1).



а - схема; б - общий вид

Рисунок 3.1 – Инструмент для ручной обдувки дробию закрепленный на фланце робота-манипулятора

Обработка проводилась с режимными параметрами, приведенными в таблице 3.1, дробью диаметром $D = 3$ мм из материала ШХ 15 ГОСТ 3722-2014. Закрепление образцов-пластин в ходе обработки производилось в тисках с применением специализированной оснастки.

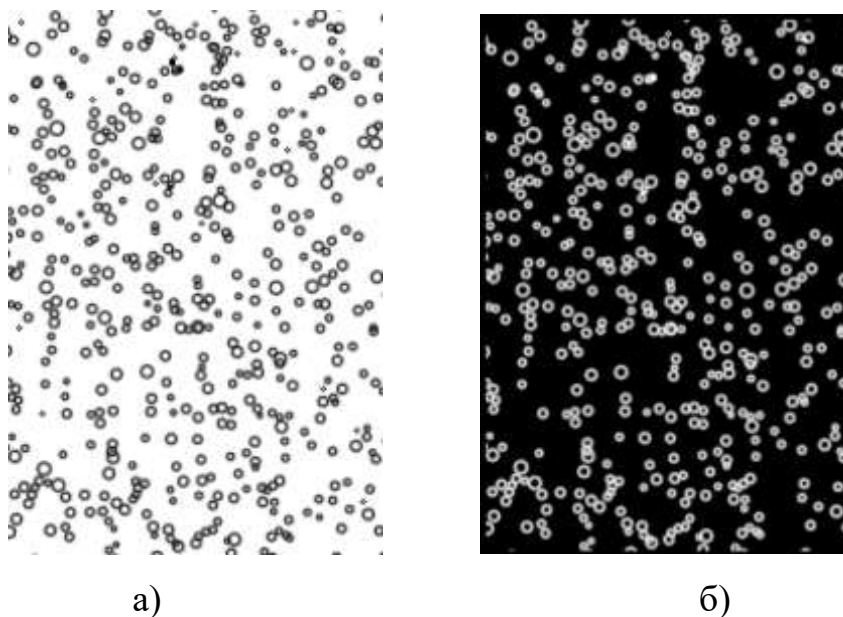
Таблица 3.1 – Режимные параметры обработки образцов для определения фракционного состава отпечатков от дроби

№ образца	Подача S , мм/с	Кол-во дроби, шт.	Давление в пневмосистеме, МПа	Диаметр дроби D , мм
1	30	15	0,7	3
2	10			3
3	5			3,1
4	2,5			3
5	1			2,9
6	0,5			3
7	30	30	0,7	3
8	10			3,1
9	5			2,9
10	2,5			3
11	1			3
12	0,5			3,1

После обработки дробью осуществлялось измерение участка поверхности, покрытого отпечатками от дроби, размерами 20×20 мм на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1, в целях получения двумерного изображения.

Для полученных изображений проводился анализ степени покрытия с помощью ручной обводки отпечатков в САД системе с последующей выгрузкой данных в Microsoft Excel и автоматизированным определением фракционного фракционного состава отпечатков с применением разработанного ПО. На рисунке 3.2 представлен результат обработки изображения с профилометра, в качестве анализируемой пластины был выбран образец №10 из таблицы 3.1.

Для оценки двух методов был проведен сравнительный анализ. В качестве критерия оценки использовалась относительная погрешность полученных результатов. Характерные результаты измерений фракционного состава ручным и автоматическим методом для образца №5 приведены в таблице 3.2.



а - ручным методом; б - с применением разработанного ПО

Рисунок 3.2 – Сравнительные результаты определения диаметров отпечатков

Таблица 3.2 – Сравнительные результаты измерений фракционного состава ручным и автоматическим методом для образца №5

Диаметр отпечатка, мм.	Кол-во отпечатков определённое ручным способом, шт.	Кол-во отпечатков определённое автоматическим способом, шт.	Относительная погрешность, %
2,5	37	35	5,1
2,6	36	39	7,7
2,7	64	69	7,2
2,8	70	74	5,4
2,9	75	78	5,1

Продолжение таблицы 3.2

Диаметр отпечатка, мм.	Кол-во отпечатков определённое ручным способом, шт.	Кол-во отпечатков определённое автоматическим способом, шт.	Относительная погрешность, %
3,0	68	64	2,9
3,1	56	59	5,1
3,2	53	49	5,4
3,3	38	37	2,6
3,4	41	41	6,8
3,5	36	41	2,7

Сравнение результатов определения параметров микрорельефа, выполненного двумя методами, показало, что при принятии ручного метода в качестве эталонного, погрешность автоматизированного метода не превышает 8%.

Основными преимуществами использования разработанного ПО для поиска отпечатков является:

- высокая скорость обработки данных (автоматизированный метод в 18 раз быстрее в сравнении с методом ручной обводки отпечатков в графическом редакторе);

- минимизация ошибок, связанных с человеческим фактором при определении фракционного состава;

- стабильность результатов - одинаковые критерии анализа для всех изображений;

- возможность обработки больших объемов данных.

Для каждого из образцов, представленных в таблице 3.1, был осуществлён автоматизированный анализ снимков поверхности полученных с профилометра с целью определения количества отпечатков, для каждого из

режимов обработки (см. таблица 3.3). Это позволило создать набор данных необходимых для определения НН способом, описанным в разделе 2.6.

Таблица 3.3 – Определение микрорельефа на участке 20x20 мм

$d_{\text{мм.}}$ № образца	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	Кол-во отпечатков шт.
1	5	6	15	11	8	5	50
2	18	27	39	34	18	10	146
3	34	42	68	62	46	14	266
4	46	70	92	82	55	25	370
5	132	165	200	217	162	45	921
6	285	340	450	355	280	155	1865
7	3	4	8	5	4	3	27
8	19	23	39	37	33	7	158
9	46	56	98	91	81	17	389
10	92	112	195	182	162	34	777
11	230	280	488	455	405	85	1943
12	460	560	975	910	810	170	3885

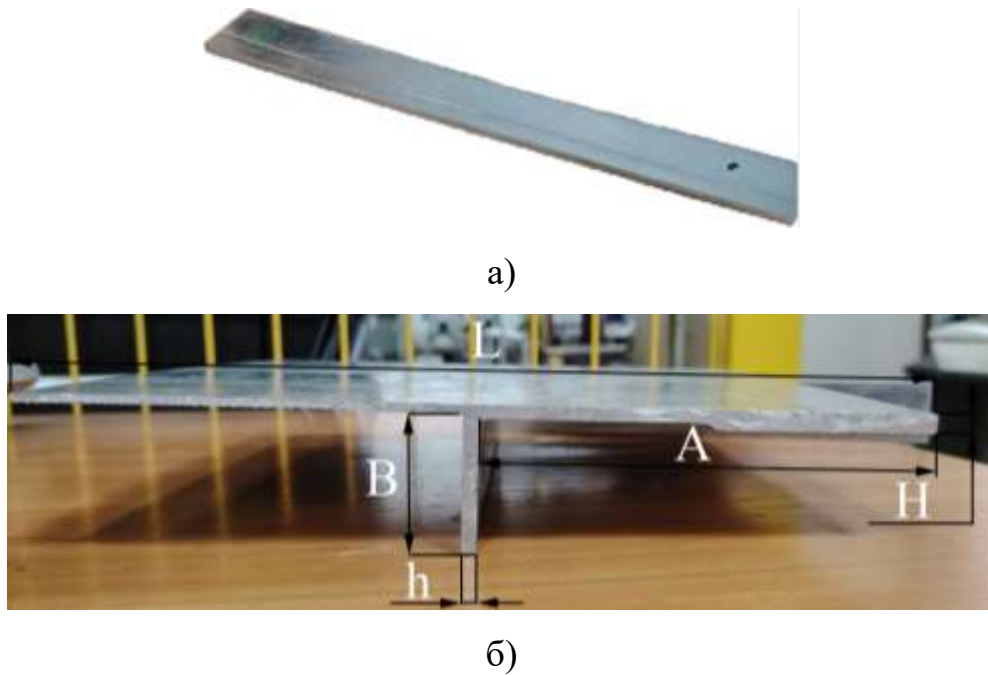
3.2 Экспериментальное исследование процесса ДУФ типовых конструктивных элементах деталей

В целях проверки адекватности методики моделирования процесса ДУФ с использованием НН и деформаций в качестве эквивалентной нагрузки были проведены исследования по обработке методом ДУФ следующих РУ:

- образцы-пластины, имитирующие полотно детали с постоянной приведенной толщиной размерами $250 \times 30 \times 4 \pm 0,05$ мм (см. рисунок 3.3а) в количестве 5 шт. (шифр образцов – П 1...5);

- образцы таврового сечения с размерами $h = 3...5$ мм; $H = 2$ мм;

$A = 50 \dots 200$ мм; $B = 30 \dots 40$ мм, длина 250 мм (см. рисунок 3.3б) в количестве 5 шт. (шифр образцов – Т 1...5);



а) образцы пластины; б) образцы с подкреплениями

Рисунок 3.3 – Общий вид образцов для проведения экспериментальных исследований

ДУФ проводилось с использованием инструмента для пневмодинамической обработки дробью, закрепленного на фланце роботоманипулятора (см. рисунок 3.1) для обеспечения стабильной скорости подачи, с режимами, приведенными в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Режимные параметры обработки типовых конструктивных элементов деталей методом ДУФ

№	Шифр образца	Подача S, мм/с	Кол-во дроби шт	Давление в пневмосистеме МПа	Диаметр дроби мм.
1	П1	2,5	15	0,7	3
2	П2	2,5	30		3
3	П3	5	15		3,5
4	П4	5	30		3,5

Продолжение таблицы 3.4

№	Шифр образца	Подача S, мм/с	Кол-во дроби шт	Давление в пневмосистеме МПа	Диаметр дроби мм.
5	П5	30	30	0,7	3,5
6	T1	2,5	15		3
7	T2	2,5	30		3
8	T3	2,5	45		3
9	T4	10	30		3,5
10	T5	10	45		3,5

Методика проведения экспериментальных исследований схематично показана на рисунке 3.4 и включает следующие основные этапы:

1) Формирование массива данных, содержащего размерные параметры образцов, величины формируемых стрел прогиба и параметры режимов обработки согласно таблице 3.4 по методике, изложенной в разделе 2.6.

2) Формирование базы данных типовых конструктивных элементов деталей с использованием КЭМ. В качестве конструктивных элементов были выбраны пластины, расчетные участки (РУ) – образцы с усилениями в виде ребер, а также конструктивно подобные образцы (КПО), обладающие геометрическими параметрами, аналогичными авиационным деталям.

3) ДУФ образцов выполнялось с использованием инструмента для пневмодинамической обработки дробью на режимах обработки, указанных в таблице 3.4, с предварительным измерением исходной стрелы прогиба f_0 на базе в 200 мм, при помощи индикатора часового типа (см. рисунок 3.5).

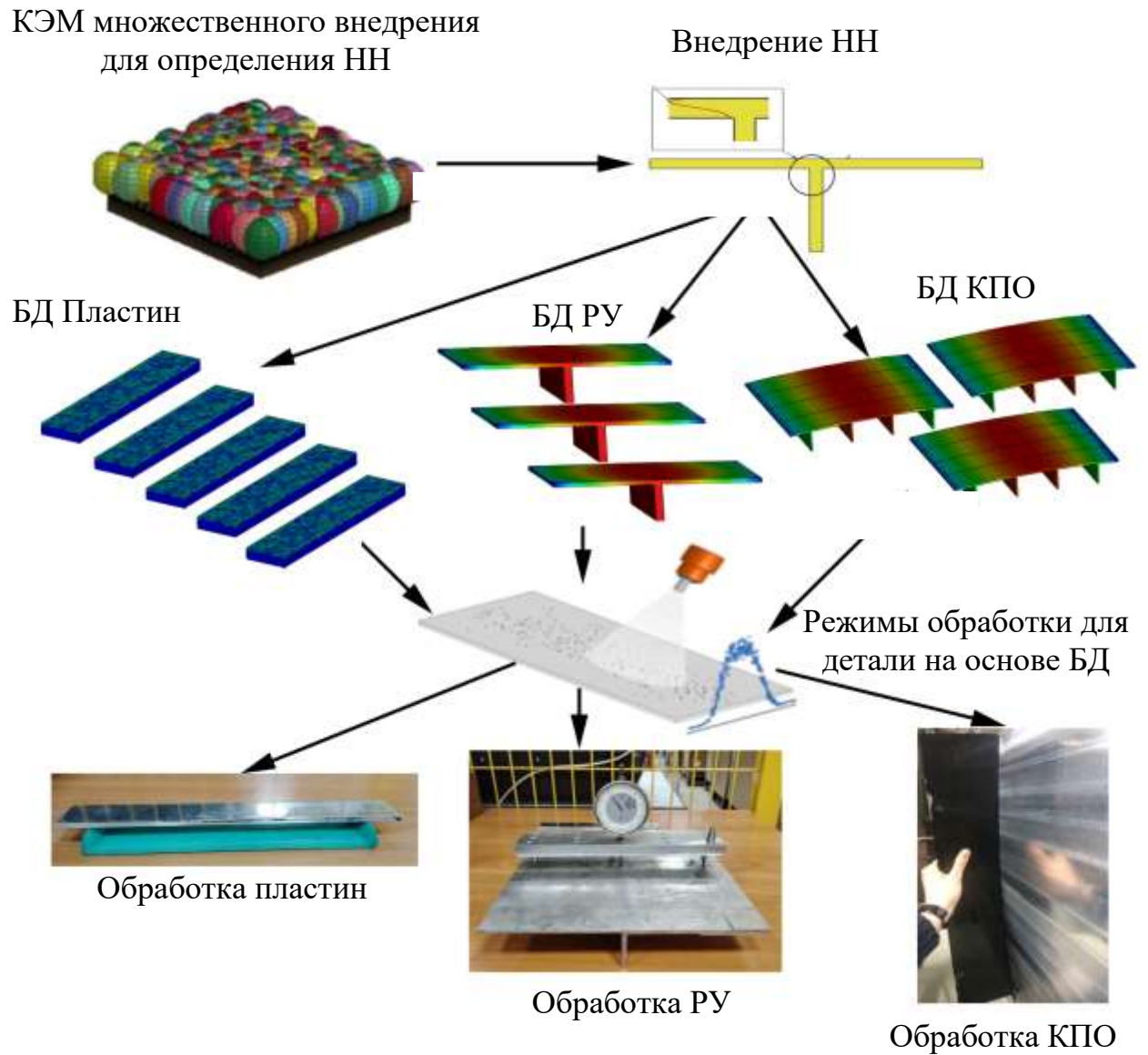
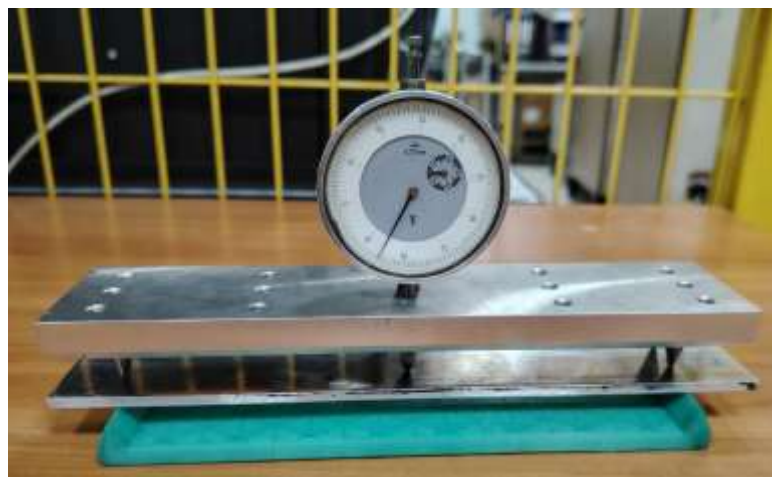
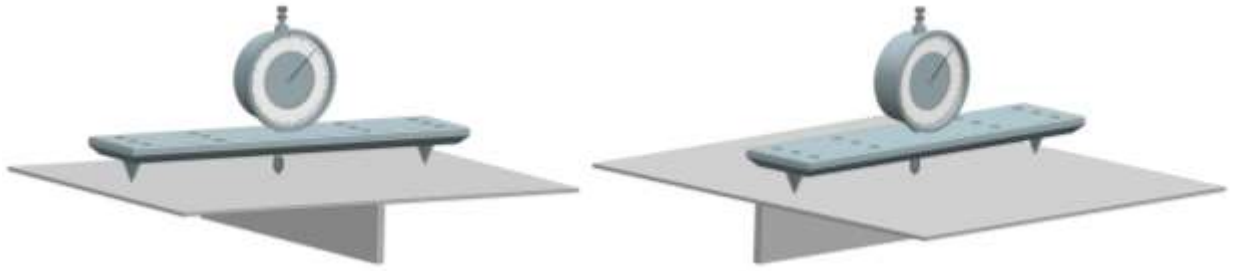


Рисунок 3.4 – Схема проведения экспериментального исследования



а)



б)

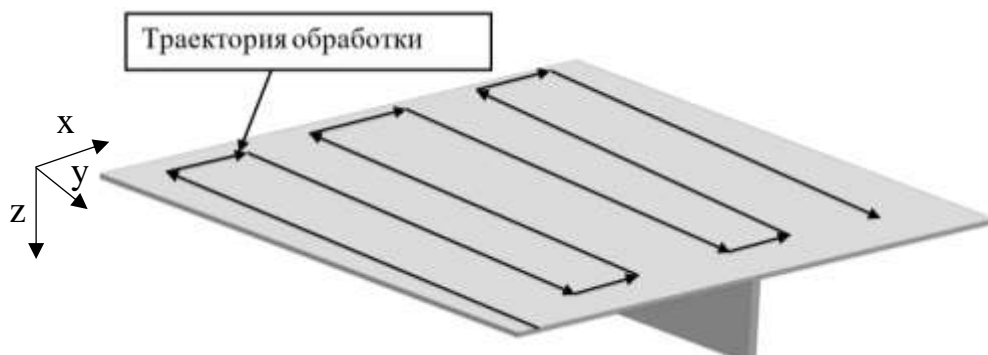
а – образец пластина; б – образец с подкреплением

Рисунок 3.5 – Измерение образцов

Схема обработки образца-пластины представляет собой одиночный проход в направлении, указанном на рисунке 3.6а. Для обработки поверхности РУ была выбрана стратегия обработки «растр», что обусловлено оптимальным перекрытием зоны обработки и минимизацией времени, затрачиваемого на обработку всей площади (см. рисунок 3.6б).



а)



б)

а - образцов-пластин; б - образцов с подкреплениями

Рисунок 3.6 – Схема обработки а) образцов-пластин и

б) образцов с подкреплениями

3) Измерение стрел прогиба образцов после ДУФ f_{xx_n} (где xx – шифр образца, n – номер режима обработки) при помощи индикатора часового типа, определение приращение стрелы прогиба после обработки:

$$\Delta f = f_{xx_n} - f_0.$$

Далее выполнялось сопоставление с данными в виде расчётной стрелы прогиба f_m – полученной при моделировании процесса ДУФ на указанных режимах обработки с использованием НН и деформаций в качестве эквивалентной нагрузки. Данные измерений приведены в таблице 3.5.

С применением формулы (2.1) было вычислено СО между теоретическим и фактическим прогибом на образцах.

Таблица 3.5 – Сравнительные данные экспериментальных исследований и результатов моделирования

№	Шифр образца	f_0 , мм	f_{xx_n} , мм	Δf , мм	f_m	СО мм.
1	П1	0,83	0,99	0,16	0,17	0,005
2	П2	0	0,3	0,3	0,29	0,005
3	П3	0	0,18	0,18	0,19	0,005
4	П4	0	0,16	0,16	0,17	0,005
5	П5	0	0,05	0,05	0,03	0,010
6	Т1	0,12	0,26	0,14	0,15	0,005
7	Т2	-0,19	0,02	0,21	0,23	0,010
8	Т3	-0,06	0,19	0,25	0,24	0,005
9	Т4	0,31	0,46	0,15	0,17	0,010
10	Т5	0,24	0,44	0,2	0,19	0,005

Полученные результаты свидетельствуют о достаточной точности применения методики моделирования процесса ДУФ с использованием НН и деформаций в качестве эквивалентной нагрузки для расчетов, связанных с определением формоизменения элементарных образцов-пластин и образцов с подкреплениями. Относительная погрешность между теоретическими и экспериментальными результатами не превышает 0,01 мм.

3.3 Исследование влияния последовательности нагружения при ДУФ

Как показали экспериментальные исследования по определению формоизменения образцов в процессе ДУФ, разработанная методика моделирования обладает достаточной точностью. Однако, в случае представления детали в виде совокупности расчётных участков (РУ), необходимо произвести оценку следующих факторов:

- взаимовлияние соседних РУ при получении кривизны отдельно взятого участка;
- взаимовлияние соседних РУ при получении переменной кривизны на отдельных участках.

Для исследования влияния последовательности нагружения при формообразовании панелей был рассмотрен конструктивно-подобный образец (КПО) подкреплённой панели размерами $887 \times 600 \times 38$ мм (см. рисунок 3.7), с переменной кривизной, который можно представить в виде совокупности 16 РУ.

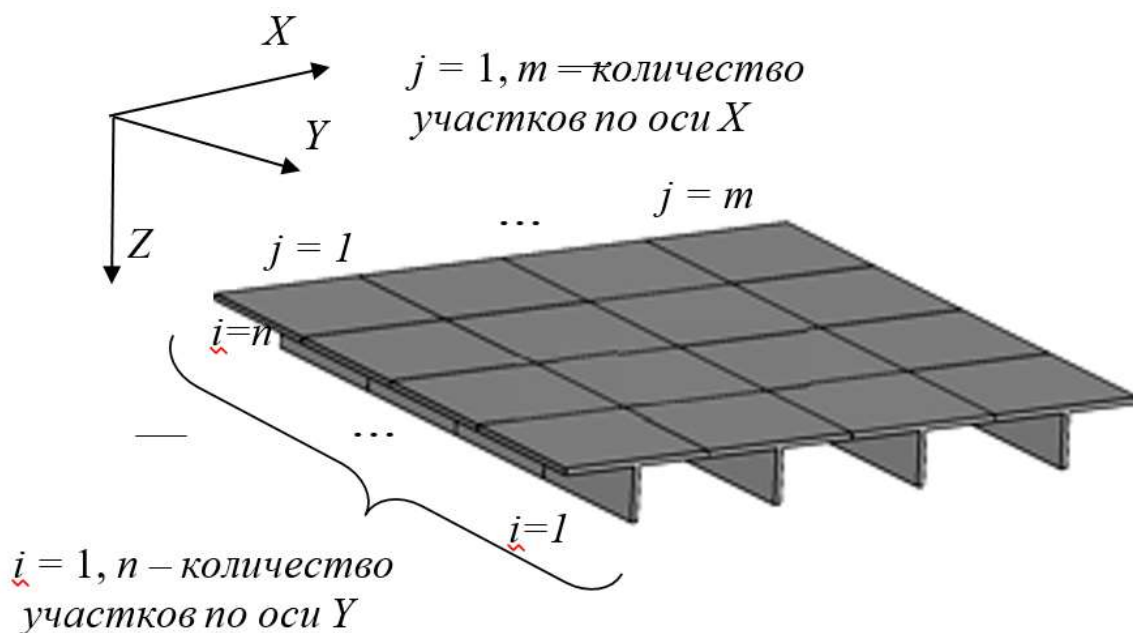


Рисунок 3.7 – Схема КПО панели с обозначением участков

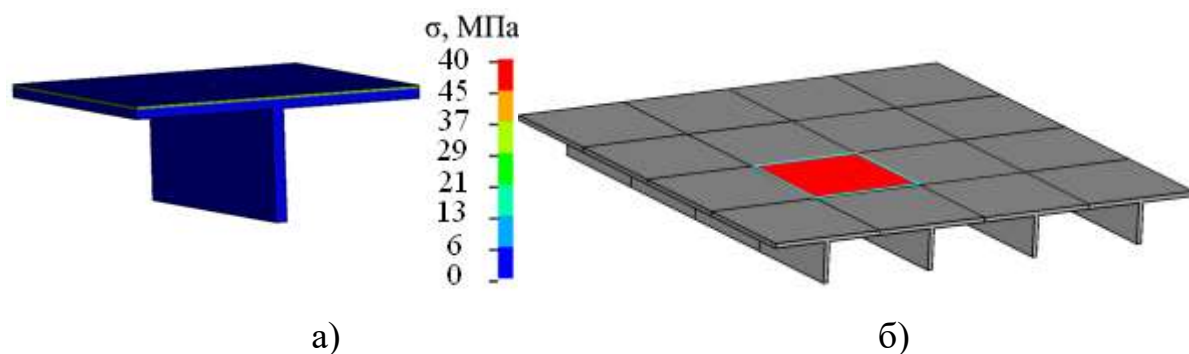
Для каждого участка были назначены значения стрел прогиба поперечного f_x и продольного f_y , на базе 200 мм по нормали к поверхности детали и параллельно плоскостям ZOX и ZOY соответственно (см. таблица 3.6.)

Таблица 3.6 – Значения теоретически полученных стрел прогиба РУ

№ участка, ij	f_x	f_y
1-1	0,42	0,25
1-2	0,36	0,21
1-3	0,33	0,20
1-4	0,53	0,31
2-1	0,40	0,24
2-2	0,53	0,31
2-3	0,50	0,29
2-4	0,33	0,20
3-1	0,42	0,25
3-2	0,50	0,29
3-3	0,38	0,23
3-4	0,43	0,25
4-1	0,50	0,29
4-2	0,40	0,24
4-3	0,40	0,24
4-4	0,36	0,21

Был рассмотрен РУ с номерами $i = 2$ и $j = 2$, обособленный от соседних РУ, и проведено моделирование процесса ДУФ данного РУ с режимам обработки, приведёнными в таблице 3.1 для образца №10 по методике, из раздела 2.6. При моделировании осуществлялось приложение НН и деформаций в поверхностный слой (см. рисунок 2.19): $\sigma_{n_n} = 40$ МПа; $\sigma_{n_m} = 45$ МПа; $\varepsilon_{n_n} = 0,018$; $\varepsilon_{n_m} = 0,024$; $h_{nl} = 0,4$ мм (см. рисунок 3.8).

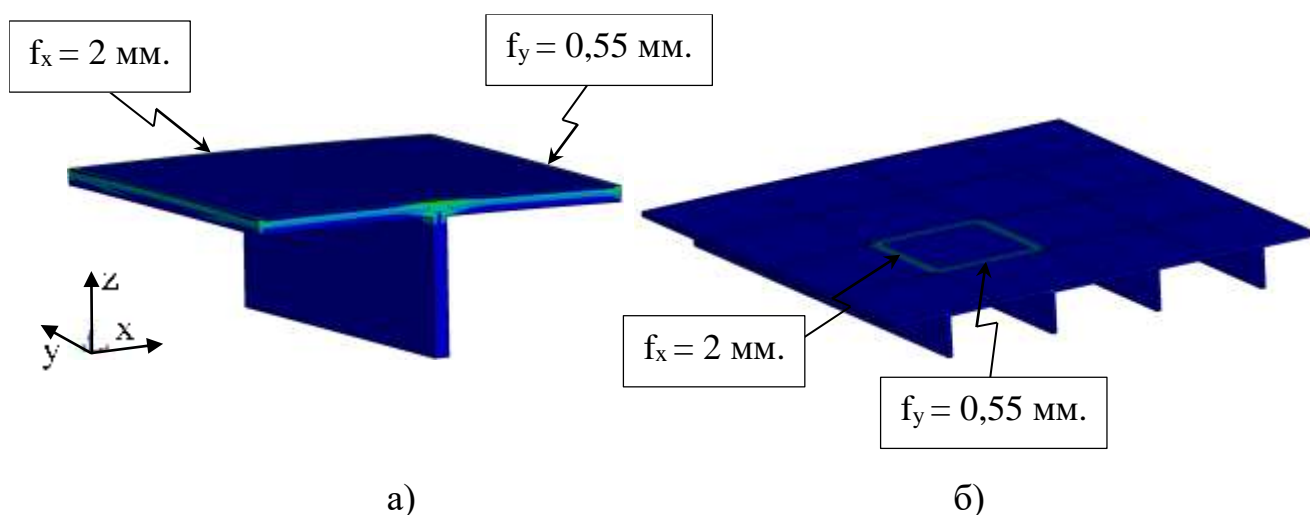
Далее было выполнено моделирование процесса ДУФ указанного РУ в составе КПО с аналогичными параметрами.



а - отдельно от детали; б - в составе детали

Рисунок 3.8 – Моделирование процесса ДУФ РУ КПО

Результаты расчета (см. рисунок 3.9), в виде значений стрел прогиба на базе 200 мм продольной f_x и поперечной f_y , по нормали к поверхности детали и параллельно плоскостям ZOX и ZOY соответственно значения приведены в таблице 3.7.



а - отдельно от КПО; б - в составе КПО

Рисунок 3.9 – Результаты моделирования процесса ДУФ участка детали

Таблица 3.7 – Значения стрел прогиба образцов f_x и f_y , полученных по результатам моделирования

Вид конструктивного элемента	f_x , мм	f_y , мм	CO f_x мм	CO f_y мм
Обособленный конструктивный элемент	2	0,05	0	0
Конструктивный элемент в составе КПО	0,609	0,074	0,983	0,0134

Для оценки относительных отклонений были рассчитаны значения среднеквадратичные отклонения стрел прогибов по формулам:

$$\text{CO } f_x = \sqrt{\frac{(f_{x_0} - \bar{f})^2 + (f_{x_p} - \bar{f})^2}{2}}; \text{CO } f_y = \sqrt{\frac{(f_{y_0} - \bar{f})^2 + (f_{y_p} - \bar{f})^2}{2}} \quad (3.2)$$

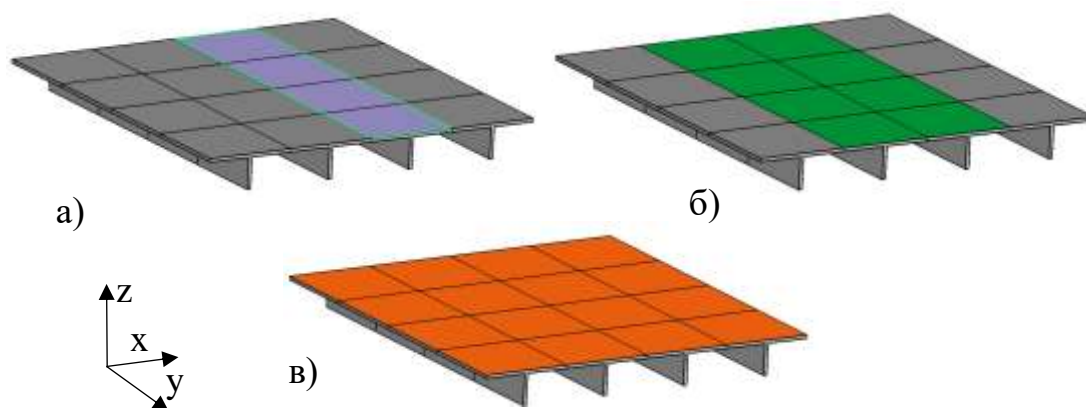
где f_{x_0} ; f_{y_0} и f_{x_p} ; f_{y_p} – стрелы прогиба на базе 200 мм полотна обособленного РУ и РУ в составе детали соответственно.

\bar{f} – среднее арифметическое значение прогиба полотна рассматриваемых РУ.

Как видно из таблицы 3.7, компоненты стрел прогиба для рассматриваемых случаев имеют отклонения $\text{CO } f_x = 0,983$ мм и $\text{CO } f_y = 0,0134$ мм, что свидетельствует о значительном влиянии соседних РУ на кривизну, формируемую на отдельно взятом РУ.

Однако на практике детали, обрабатываемые методом ДУФ, характеризуются плавно изменяемой кривизной и обработке подвергается вся поверхность детали.

В связи с этим, дополнительно были рассмотрены 3 случая обработки КПО и проведено моделирование процесса ДУФ совокупности РУ с такими же параметрами что и для обособленного РУ (см. рисунок 3.10).



а - полосовая обработка РУ №3-1 – 3-4; б - полосовая обработка РУ № 2-1 - 2-4 и 3-1 - 3-4;
в - обработка всей поверхности КПО

Рисунок 3.10 – Моделирование процесса ДУФ совокупности РУ КПО

Результаты расчета, в виде стрел продольного f_x и поперечного f_y прогибов на базе 200 мм по нормали к поверхности детали и параллельно плоскостям ZOX и ZOY соответственно приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Распределения стрел прогиба полотна f_x и f_y , полученные по результатам моделирования для трех дополнительных случаев обработки

Вид обработки	f_x , мм	f_y , мм	СО f_x , мм	СО f_y , мм
Полосовая обработка РУ №3-1 – 3-4	2,17	0,04	0,122	0,01
Полосовая обработка РУ №2-1 – 2-4 и №3-1 – 3-4	2,12	0,06	0,083	0,0018
Обработка всей поверхности КПО	1,92	0,07	0,054	0,0078

Как видно из таблицы 3.8, полосовая обработка оказывает влияние на значения стрелы прогиба, отдельно взятого РУ, однако, в случае обработки всей поверхности КПО на одном режиме, СО стрел прогиба на базе 200 мм. РУ не превышают 0,122 мм для f_x и 0,01 мм для f_y .

Поскольку большинство обводообразующих деталей характеризуется переменной, плавно-изменяющейся кривизной, был рассмотрен случай, когда КПО представляет собой совокупность конструктивных элементов, объединенных в полосы (А, В, С, D) с постоянным значением поперечной стрелы прогиба (f_{A-x} , f_{B-x} , f_{C-x} и f_{D-x}) на каждой полосе (см. рисунок 3.11).

Для данной детали, по методике, приведённой в разделе 2.6, была выполнена серия из четырех расчетов по ДУФ каждого РУ в виде полосы с режимными параметрами процесса, указанными в таблице 3.9. Дополнительно было проведено моделирование обособленного, то есть не имеющего связи с соседними участками, РУ на тех же режимах обработки.

Результаты моделирования процесса ДУФ КПО в виде значений прогиба на измерительной базе в 200 мм. по оси X приведены в таблице 3.10. Результаты моделирования процесса ДУФ обособленного РУ – в таблице 3.11

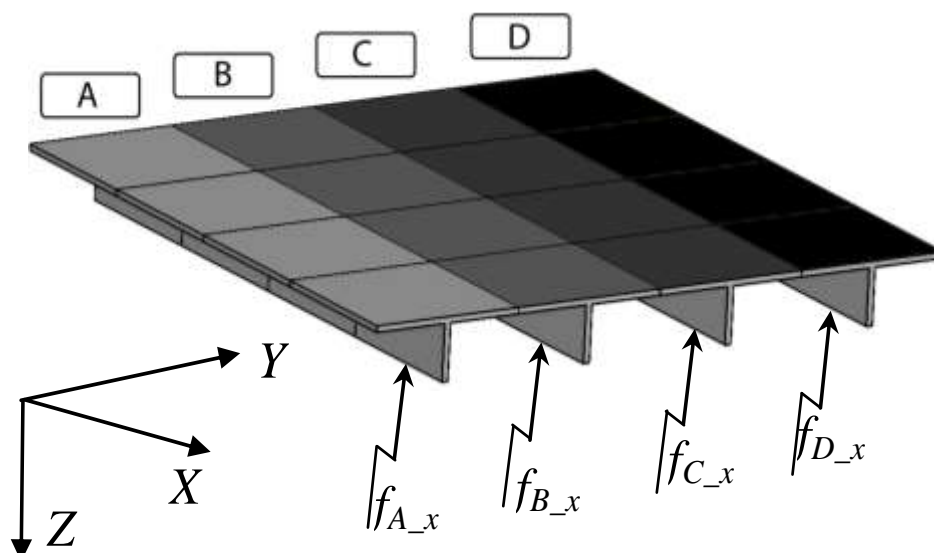


Рисунок 3.11 – Схема к моделированию процесса ДУФ для оценки взаимодействия соседних участков

Таблица 3.9 – Режимные параметры процесса ДУФ используемые при моделировании (заливкой выделены одинаковые режимы обработки)

№ расчета	$\sigma_{н_н}$, МПа			
	полоса А	полоса В	полоса С	полоса D
1	150	100	175	200
2	150	200	175	100
3	150	175	200	100
4	200	150	175	100

Таблица 3.10 – Результаты моделирования процесса ДУФ детали в виде совокупности конструктивных элементов с переменной стрелой прогиба (заливкой выделены одинаковые режимы обработки)

№ расчета	f_x , мм			
	полоса А	полоса В	полоса С	полоса D
1	1,84	1,34	2,13	2,44
2	1,90	2,44	2,21	1,28
3	1,86	2,13	2,36	1,32
4	2,44	1,89	2,12	1,28

Таблица 3.11 – Результаты моделирования процесса ДУФ обособленного РУ

σ_n , МПа	f_x , мм
100	1,24
150	1,86
175	2,16
200	2,42

Таким образом, вне зависимости от последовательности полосовой обработки, при условии обработки всей поверхности детали, участки, обрабатываемые на одном режиме, будут иметь относительные отклонения не более 8%. По сравнению с аналогичным обособленным РУ, обрабатываемым на тех же режимах, стрела прогиба, формируемая при обработке совокупности РУ с переменной кривизной, отличается не более чем на 10 %.

Таким образом, при определении режимов обработки реальных деталей расчёты с применением разработанной в главе 2 методики можно выполнять на РУ, обрабатываемых с одинаковыми режимами, без учёта влияния соседних РУ и последовательности обработки детали в целом.

3.4 Экспериментальное исследование технологического процесса ДУФ на конструктивно-подобных образцах оребрённых панелей

С целью верификации разработанных методик моделирования процесса ДУФ были проведены исследования по обработке конструктивно подобных образцов (КПО) в количестве 3 шт. с размерами, показанными на рисунке 3.12. Общий вид КПО приведен на рисунке 3.13.

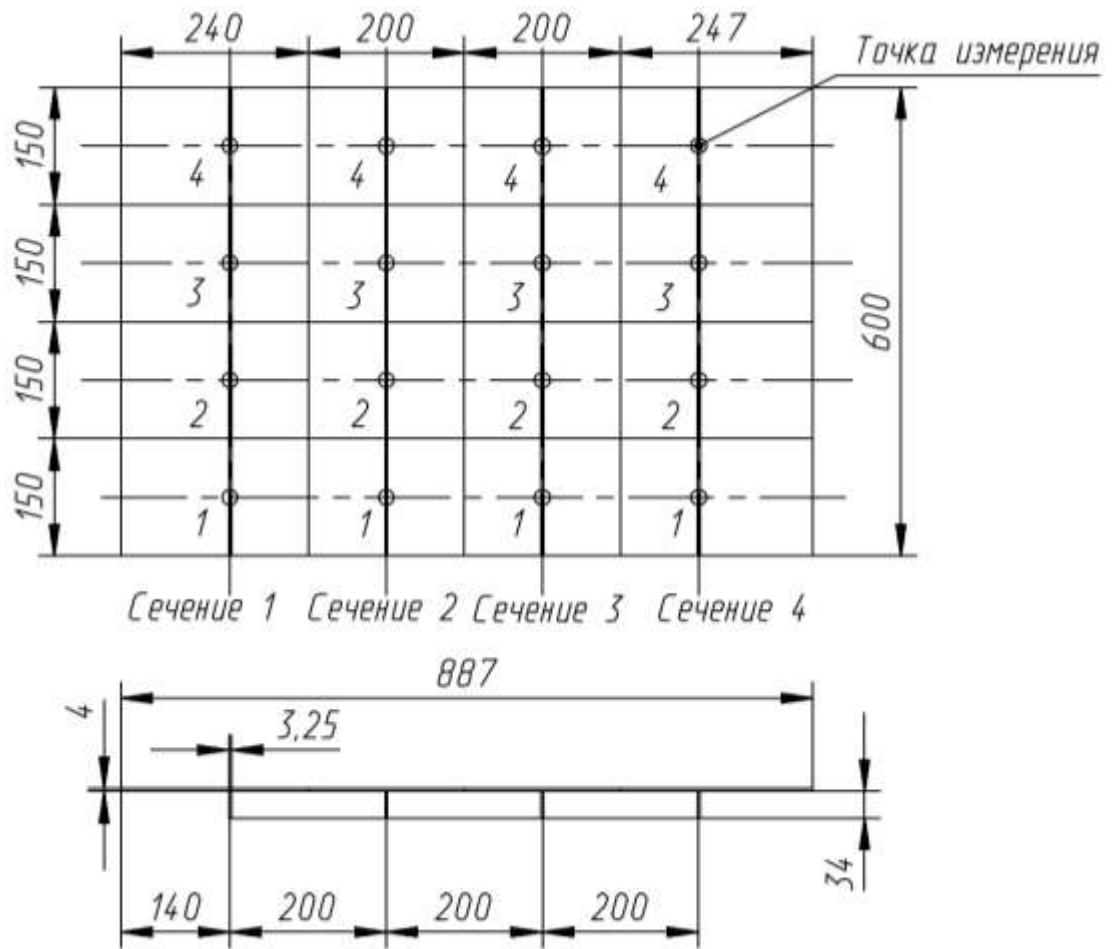
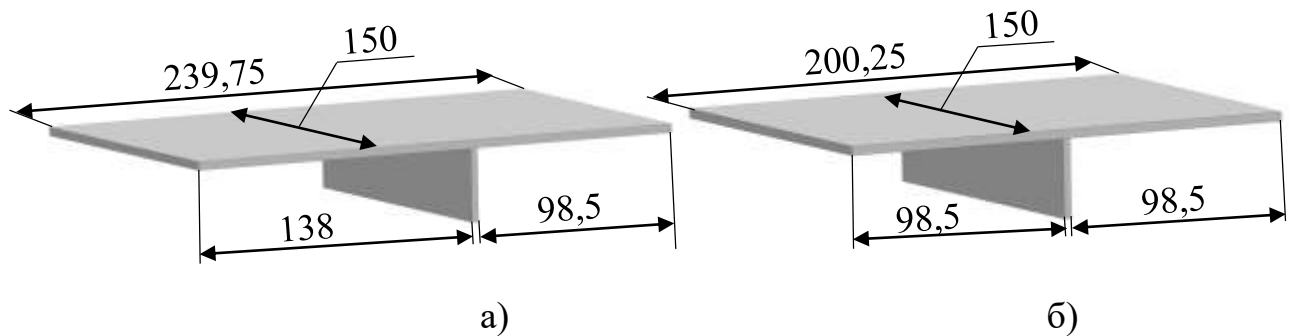


Рисунок 3.12 – Эскиз КПО с размерами для разметки при измерении стрелы прогиба



Рисунок 3.13 – Общий вид КПО

Наружная поверхность КПО была разделена на прямоугольные участки размерами $150 \times 239,75$ мм (8 шт.) и $150 \times 200,25$ мм (8 шт.). Общий вид типовых РУ представлен на рисунке 3.14. Для данных РУ было проведено моделирование процесса ДУФ с использованием НН и деформаций в качестве эквивалентной нагрузки и определена зависимость кривизны, от величины эквивалентной нагрузки (см. рисунок 3.15).



а – РУ №1 в составе КПО; б – РУ №2 в составе КПО

Рисунок 3.14 – Типовые РУ в составе КПО

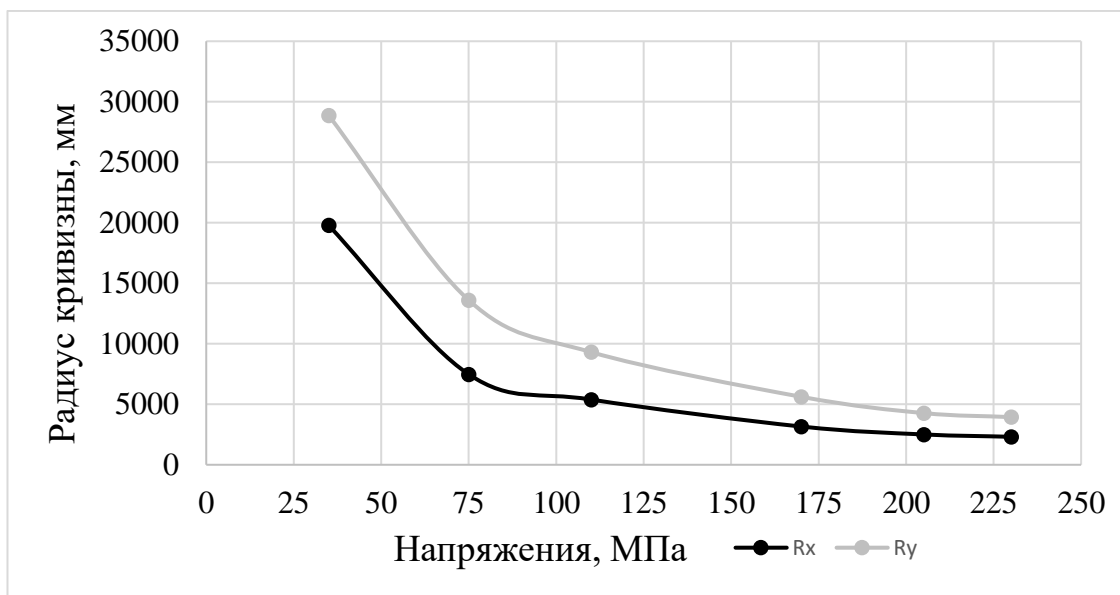


Рисунок 3.15 – Графики зависимости кривизны, формируемой на участке от величины нагрузки

При помощи программного модуля, описанного в разделе 2.6, были определены соответствующие данной нагрузке режимные параметры процесса ДУФ для каждого участка (см. таблицу 3.12).

Таблица 3.12 – Режимные параметры процесса обработки РУ КПО

№ РУ	Режимные параметры обработки:	
	Скорость подачи, м/сек	Давление в пневмо-системе, МПа
1.1-1.4	0,0025	0,7
2.1-2.4	0,0025	
3.1-3.4	0,0035	
4.1-4.4	0,0015	

ДУФ КПО выполнялся в следующей последовательности.

1) Перед началом обработки на лицевой поверхности КПО была нанесена разметка для определения границ РУ, а также обозначены контрольные точки для реализации процесса измерения стрелы прогиба контрольных точках при помощи индикатора часового типа.

2) Осуществлялось измерение стрел прогиба в продольном f_{x_0} и поперечном f_{y_0} по нормали к поверхности детали и параллельно плоскостям ZOX и ZOY соответственно. Измерения прогиба проводилось на базе 200 мм. Данные измерений заносились в таблицу 3.13.

3) Исходя из таблицы 3.12, были сформированы управляющие программы для ДУФ с использованием инструмента для пневмодинамической обработки дробью, закрепленного в схвате робота-манипулятора для обеспечения стабильной скорости подачи (см. рисунок 3.16). Обработка проводилась в свободном состоянии детали. В качестве стратегии обработки был выбран «растр» (см. рисунок 3.17), что позволяет проводить оценочные измерения прогиба после обработки каждой полосы.



Рисунок 3.16 – ДУФ КПО с использованием инструмента для пневмодинамической обработки дробью

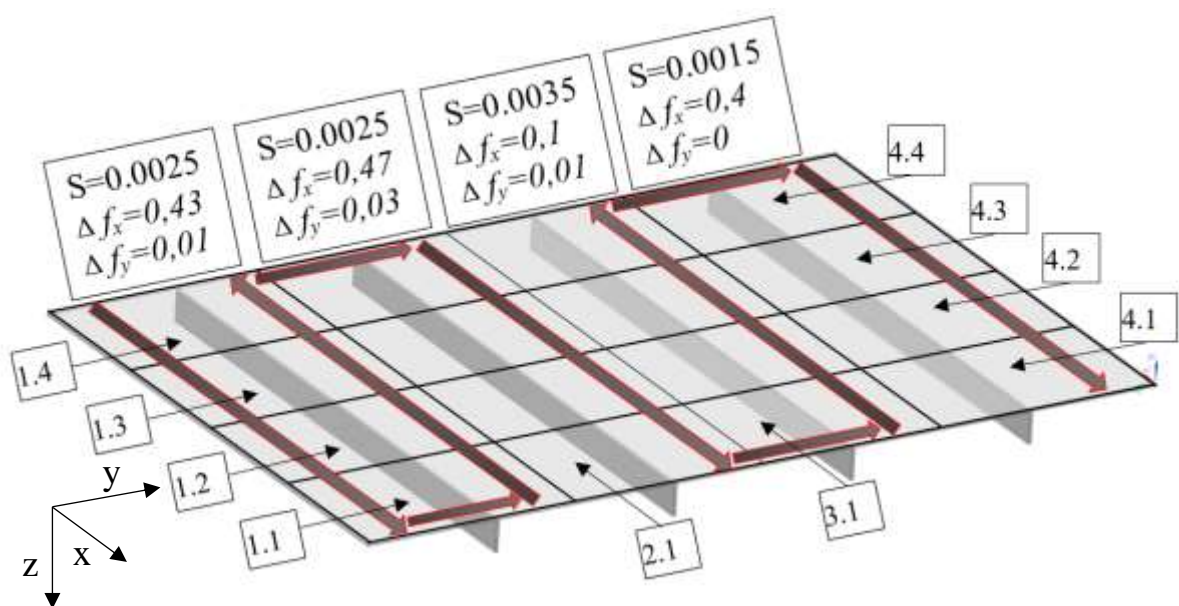


Рисунок 3.17 – Стратегия обработки КПО

3) После ДУФ выполнялось измерение стрел прогиба в каждой контрольной точке, для продольного f_x и поперечного f_y направления на базе 200 мм по нормали к поверхности детали и параллельно плоскостям ZOX и ZOY соответственно. Данные измерений приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Данные измерений стрелы прогиба КПО после ДУФ

№	Стрела прогиба на базе 200 мм							
	$f_{x_0}, мм$	$f_{y_0}, мм$	$f_x, мм$	$f_y, мм$	$\Delta f_x, мм$	$\Delta f_y, мм$	$f_{x_m}, мм$	$f_{y_m}, мм$
1.1	0,05	-0,06	0,46	0	0,41	0,06	0,46	0,04
1.2	-0,16	0,10	0,18	0,01	0,34	0,09	0,33	-0,11
1.3	-0,1	-0,04	0,23	0,05	0,33	0,09	0,36	0,1
1.4	-0,4	-0,03	0,24	-0,02	0,54	0,01	0,59	0,01
2.1	-0,03	-0,07	0,57	-0,06	0,4	0,01	0,38	0,02
2.2	-0,14	-0,07	0,42	-0,06	0,56	0,01	0,51	0
2.3	-0,19	-0,07	0,27	-0,04	0,46	0,03	0,44	0,02
2.4	-0,06	-0,1	0,23	-0,02	0,29	0,08	0,3	0,1
3.1	0,20	-0,03	0,30	-0,02	0,1	0,01	0,12	-0,01
3.2	-0,20	-0,02	-0,15	-0,02	0,05	0	0,09	0,01
3.3	0,42	-0,11	0,54	-0,1	0,12	0,01	0,09	0
3.4	0,24	-0,08	0,4	-0,06	0,16	0,02	0,13	0,02
4.1	0,41	-0,08	0,9	-0,09	0,49	0,01	0,52	-0,01
4.2	0,17	-0,04	0,55	-0,04	0,38	0	0,37	-0,02
4.3	-0,03	-0,03	0,36	-0,04	0,39	0,01	0,38	-0,01
4.4	0,15	-0,05	0,49	-0,03	0,34	0,02	0,34	0,03

Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными демонстрирует высокую степень корреляции. Отклонения между результатами моделирования и экспериментальными данными по поперечной стреле прогиба на базе длиной 200 мм не превышают 0,05 мм, а в продольном направлении – не более 0,02 мм. Это показывает высокую степень корреляции между результатами численного моделирования и экспериментальными данными.

Выводы по 3 главе

1. В ходе проведённых экспериментальных исследований доказана применимость разработанной методики ПО для автоматизированного определения параметров микрорельефа поверхности, обработанной при ДУФ, при этом установлено, что:

- погрешность автоматизированного метода по сравнению с методом ручной обводки отпечатков на электронных фотографиях не превышает 8 %;

- разработанное ПО ускоряет обработку данных в 18 раз, минимизирует ошибки, связанные с человеческим фактором и позволяет обрабатывать большие массивы данных.

2. Исследования процесса ДУФ на расчётных участках (РУ) в виде типовых конструктивных элементов деталей подтвердили достаточную точность методики моделирования процесса ДУФ, использующей НН и деформации в качестве эквивалентной нагрузки. При испытаниях стабильность и точность регулирования режимов ДУФ обеспечена использованием инструмента для пневмодинамической обработки дробью, закрепленного на фланце робота-манипулятора. Относительная погрешность между расчётными и экспериментальными результатами определения стрелы прогиба РУ на базе в 200 мм не превышает 0,13 мм при допустимом отклонении контура деталей 0,5 мм.

4. При численном исследовании процесса ДУФ на конструктивно-подобных образцах (КПО) деталей типа подкреплённых панелей установлено, что при условии обработки всей поверхности КПО с одинаковыми режимами, отклонения получаемых прогибов, обособленных РУ и РУ в составе КПО незначительны и не превышают в поперечном направлении 2,3 %, в продольном 5 %. Исследование по ДУФ КПО с переменной кривизной показало соответствующие отклонения не более 10 %. Из этого следует, что при определении режимов обработки реальных деталей расчёты с применением разработанной в главе 2 методики можно выполнять на РУ,

обрабатываемых с неизменными режимами, без учёта влияния соседних РУ и последовательности обработки детали в целом.

5. Эксперименты по ДУФ на КПО деталей типа подкреплённых панелей продемонстрировали высокую степень корреляции между результатами численного моделирования и экспериментальными данными.

4. Технология, оборудование и программное обеспечение процесса формообразования панелей и обшивок на оборудовании с ЧПУ

4.1 Структура серийного технологического процесса формообразования панелей и обшивок и применяемое оборудование

Назначение операции ДУФ в комбинированном технологическом процессе формообразования панелей и обшивок (см. рисунок 1.14) – получение поперечной кривизны контура деталей. Предварительно выполняется операция получения продольной кривизны раскаткой роликами, посадкой и разводкой для панелей с подкрепляющими рёбрами или упругопластической гибкой для деталей типа обшивок.

Опыт применения установок серии УДФ при ДУФ деталей с длиной до 15 метров показал их преимущество перед прессовым методом в виде значительного увеличения производительности и достижения высокой точности формы деталей. Однако, в случае изготовления длинномерных деталей, длина которых может превышать 25 метров, а также в связи с необходимостью организации серийного производства самолётов со значительным увеличением программ выпуска, становится актуальной задача повышения производительности технологического процесса ДУФ.

Время T , при ДУФ участка детали, показанного на рисунке 4.1, ДУФ на установке контактного типа (УКТ) (см. рисунок 1.16) определяется формулой

$$T = \frac{S}{b \cdot F_m}, \quad (4.1)$$

S – площадь поверхности детали ($A \cdot B$), мм²;

b – ширина полосы обработки мм;

F_m – скорость подачи дробеметного аппарата мм/мин.

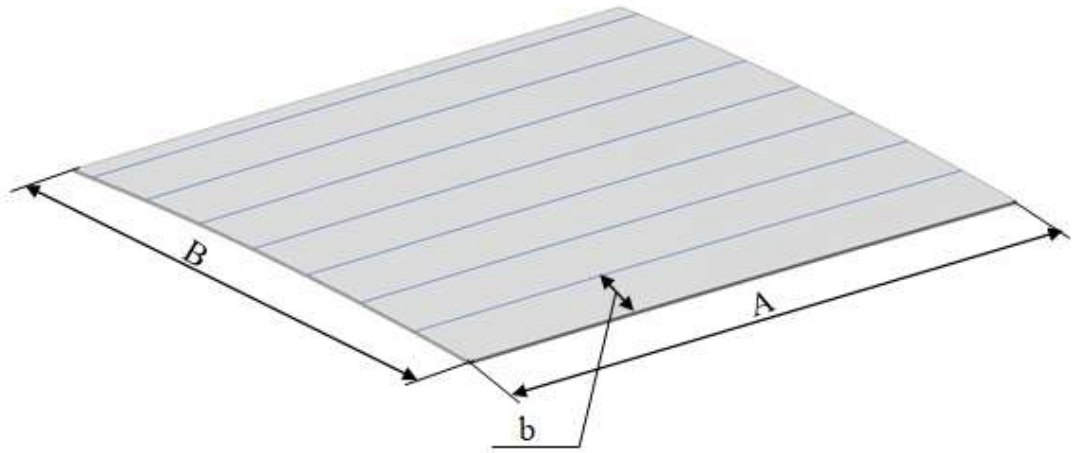


Рисунок 4.1 – Участок поверхности детали для расчета времени ДУФ

Из формулы (4.1) следует, что добиться снижения времени обработки можно путём увеличения ширины полосы обработки. Максимальная производительность будет достигнута при $b = B$, т.е. при обработке по всей ширине детали на установке проходного типа (УПТ). Данное оборудование применяется для поверхностного деформационного упрочнения (см. рисунок 1.19).

Преимуществом УПТ является высокая производительность, однако возможность применения данного оборудования для ДУФ ограничивается деталями с постоянной поперечной кривизной. Как видно из схемы обработки, показанной на рисунке 1.20, отечественные УПТ позволяют регулировать только общую интенсивность потока дроби при перемещении детали через рабочую камеру.

Таким образом, в серийном автоматизированном производстве крупногабаритных обводообразующих деталей задача повышения производительности может быть решена путём разделения технологического процесса (ТП) ДУФ на следующие операции:

- высокопроизводительная черновая обработка по всей ширине детали на УПТ с получением промежуточного контура с постоянной поперечной кривизной.

- доводочная обработка на УКТ до достижения требуемой точности формы, совмещённая с контролем поперечного контура детали.

Для реализации серийного ТП формообразования панелей и обшивок ИРННТУ разработано следующее оборудование для ДУФ и дробеударной упрочняющей обработки.

Установка проходного типа (УПТ) для черновой формообразующей обработки и дробеударно упрочнения (ДУУ)

Данная установка разработана на базе программной дробемётной установки УДП-2-2,5 конструкции ОАО «НИАТ» (см. рисунок 1.19) и представляет собой рабочую камеру проходного типа с внешней системой циркуляции дроби, с устройствами разгона дроби, установленными с двух сторон на боковых стенках рабочей камеры (см. рисунок 4.2).

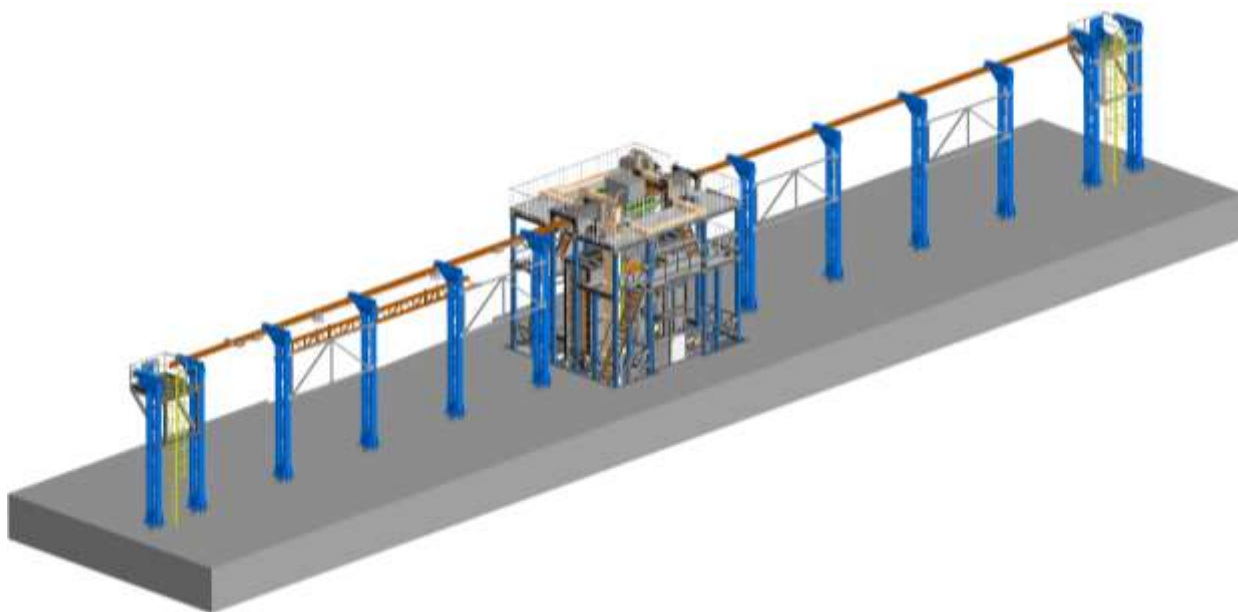


Рисунок 4.2 – УПТ для черновой формообразующей обработки и упрочняющей обработки

Обрабатываемые детали перемещаются через рабочую камеру установки УПТ посредством системы транспортирования в вертикальном положении. Обработка дробью на данной установке осуществляется с

применением восьми дробеметных аппаратов (ДА) центробежного типа (по 4 ДА с каждой стороны рабочей камеры). Режимы обработки, включая частоту вращения ДА и скорость подачи обрабатываемой детали, контролируются с помощью системы ЧПУ.

Рабочей средой установки УПТ является смесь стальной литой дроби необходимого количества и фракционного состава для реализации операций ДУФ и ДУУ.

В отличие от прототипа в разработанной установке предусмотрена возможность автоматического регулирования потока, дроби в процессе обработки для достижения формообразующего эффекта. УПТ оснащается электронной системой определения интенсивности воздействия потока дроби на деталь для настройки зоны обработки (взамен применяемой в настоящее время настройки с применением контрольных пластин); сепаратором-разделителем, обеспечивающим работу установки с использованием в качестве рабочей среды двух фракций дроби – крупной, для формообразования, и мелкой, для упрочнения; системой автоматизированного регулирования потока дроби; системой бесконтактного контроля сплошности покрытия поверхности детали отпечатками дроби. Технические характеристики установки УПТ приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Технические характеристики установки УПТ для черновой формообразующей обработки и упрочняющей обработки

Наименование параметров	Ед. изм.	Значения
Обрабатываемые материалы: высокопрочные алюминиевые сплавы (В95, 1163, Д16 и др.)		
Обрабатываемые заготовки: фрезерованная панель крыла, пояс лонжерона, стрингер и т.д.		
Максимальные габариты обрабатываемых деталей:		
- длина		20 000
- ширина	мм	2 000
- толщина (с учетом стрелы прогиба в продольном направлении)		500

Продолжение таблицы 4.1

Наименование параметров	Ед. изм.	Значения
Количество одновременно обрабатываемых поверхностей, не менее	шт.	1
Рабочие тела - дробь стальная литая должна соответствовать требованиям ПИ 1.4.1623-2008.		
Максимальная стрела прогиба фрезерованной панели, после формообразования	мм	300
Скорость вылета дроби	м/с	15...50
Скорость подачи детали	м/мин	0,5...2,0
Режимы и контроль обработки согласно инструкций: №949-69 ВИАМ; ПИ 1.4.379-91 НИАТ, ПИ 1.4.2207-2008 НИАТ, ПИ 1.4.1623-2008 НИАТ, ПИ 1.4.538-83 НИАТ		
Габаритные размеры комплекса (включая систему подачи и перемещения), не более	мм	32 000 10 000 8 000
- длина		
- ширина		
- высота		
Тип электропитания – 3-х фазное		
Номинальное напряжение	В	380 ± 10 %
Место размещения установки – закрытое помещение		
Максимальная потребляемая мощность, не более	кВт	200
Значения характеристического показателя рабочей среды:	°С	+5 +40
- минимальное		
- максимальное		
Управление комплексом осуществляется при помощи локального выносного пульта или с рабочего места оператора программируемой системой управления		
Программируемая система управления:		
- регулирует скорость вылета дроби;		
- регулирует скорость подачи детали через рабочую камеру.		

Установка контактного типа (УКТ) для доводочного дробеударного формообразования и зачистки

Установка (см. рисунок 4.3) разработана на базе установки УДФ-4 конструкции ИРНТУ (см. рисунок 1.17). Рабочие органы установки УКТ – ДА с замкнутой системой циркуляции дроби и зачистная головка с абразивными лепестковыми кругами перемещаются относительно

неподвижной детали. В отличие от прототипа разработанная установка оснащена системой бесконтактного контроля формы деталей и автоматизированной системой фиксации, обеспечивающей управление продольным контуром деталей в процессе обработки. Технические характеристики установки УКТ приведены в таблице 4.2.

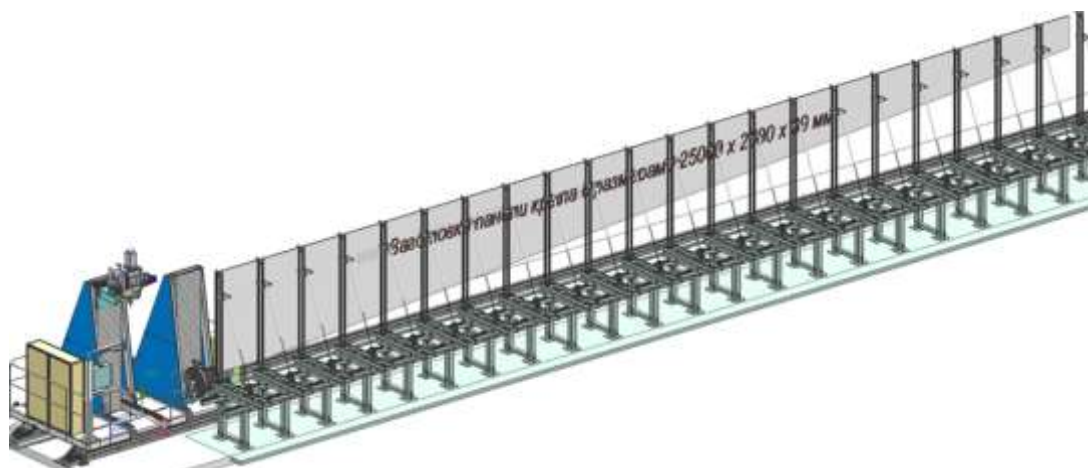


Рисунок 4.3 – УКТ для доводочного дробеударного формообразования и зачистки

Таблица 4.2 – Технические характеристики установки УКТ для доводочного ДУФ

Наименование параметров	Ед. изм.	Значения
Максимальные размеры обрабатываемой детали: - длина (координата X) - прогиб перпендикулярно поверхности (координата Y) - ширина (координата Z) - толщина	мм	25000 800 2050 1,5 ... 20
СИСТЕМА ФИКСАЦИИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ		
Максимальная масса детали	кг	1000
Количество стоек фиксации детали	шт.	24
Нагрузка на одну стойку, не более	кг	100
Величина поперечного перемещения стоек	мм	800
Точность поперечного позиционирования, не более	мм	±1
Угол наклона стойки	градус	±15
Точность углового позиционирования, не более	градус	±1
Максимальная скорость поперечного перемещения	м/мин	1

Продолжение таблицы 4.2

Наименование параметров	Ед. изм.	Значения	
Максимальная скорость наклона	°/мин	90	
Диаметр применяемой дроби	мм	0,5..4	
Диаметр дробеметного колеса	мм	400	
РАБОЧИЙ ОРГАН – ДРОБЕМЕТНЫЙ АППАРАТ ЗД400М			
Ширина полос обработки	мм	100, 200, 300, 400	
Максимальная частота вращения	мин ⁻¹	3000	
Мощность двигателя, не менее	кВт	5,5	
РАБОЧИЙ ОРГАН – ЗАЧИСТНАЯ ГОЛОВКА ЗГР-1			
Диаметр шлифовальных кругов (номинал)	мм	350	
Максимальная частота вращения шлифовальных кругов	мин-1	1500	
Мощность двигателя, не менее	кВт	5,5	
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ			
Наибольшее программируемое перемещение по координатам, не менее	X	мм	25000
	Y		800
	Z		2000
	A	°	± 15
Точность позиционирования по оси X на 1 м перемещения, не более	мм	±2,5	
Точность позиционирования по осям Y, Z на 1 м, не более	мм	±1	
Точность позиционирования по оси A, не более	°	1	
Максимальная скорость подачи рабочего органа в продольном направлении (координата X), не менее	м/мин	8	
Максимальная скорость подачи рабочего органа в поперечном направлении (координата Y), не менее	м/мин	0,5	
Максимальная скорость подачи рабочего органа в вертикальном направлении (координата Z), не менее	м/мин	8	
Максимальная скорость вращения рабочего органа (координата A), не менее	°/мин	300	
Число одновременно управляемых координат, не менее		4	
Мощность электродвигателя по координате X, не менее	кВт	6,6	
Мощность электродвигателя по координате Y, не менее	кВт	2,4	
Мощность электродвигателя по координате Z, не менее	кВт	3,4	
Мощность электродвигателя по координате A, не менее	кВт	1,7	

Состав операций комплексного ТП, включающего операции ДУФ и ДУУ деталей типа обшивок в виде совокупности операций – расчётных (РО), контрольных (КО) и технологических (ТО) приведен на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Состав операций технологического процесса формообразования-упрочнения деталей типа обшивок

Операции ТП формообразования-упрочнения деталей типа обшивок реализуются следующим образом.

РО-1. Предварительно для каждой детали осуществляется определение геометрических параметров обрабатываемых участков. Теоретическая САД модель детали при помощи специального ПО, автоматически разбивается на РУ – участки, обрабатываемые с неизменными режимами на черновом и доводочном этапах ДУФ, исходя из требуемой точности формообразования. Результаты расчёта оформляются в виде БД геометрических характеристик детали. Параллельно путём КЭМ формируются БД режимов обработки в виде зависимостей компонент кривизны РУ от эквивалентной нагрузки, определяемой параметрами ДУФ.

КО 1. Контроль формы заготовки.

Реализуется посредством интегрированной в состав установки УКТ контрольно-измерительной системы (КИС), обеспечивающей определение координат контрольных точек на наружной (аэродинамической) поверхности заготовки. ПО КИС обеспечивает «оцифровку» полученного при измерении массива координат точек с построением 3D модели поверхности детали.

РО-2. Корректировка геометрических параметров обрабатываемых участков по результатам КО-1.

По 3D модели поверхности заготовки, являющейся результатом контроля формы, определяются значения компонент кривизны РУ, которые заносятся в БД геометрических характеристик детали.

РО-3. Подготовка УП образования продольной кривизны детали.

Для получения продольной кривизны деталей типа обшивок, имеющих переменную толщину, а также для гибки участков деталей с толщиной более 20 мм в предлагаемом ТП может быть использовано прессовое оборудование для гибки в передвижку. В серийном производстве предполагается использование автоматизированного оборудования, разработанного НИАТ специального правильного прессы СПП-250 (см. рисунок 1.5).

Продольная компонента кривизны детали κ_y^{Γ} ($\kappa = 1/R$, где R – радиус кривизны), образуемой гибкой, определяется для линийгиба, расположенной по нормали к центральным образующим поверхностей теоретического контура детали из соотношения (4.2)

$$\kappa_y^{\Gamma} = \kappa_y^T + \kappa_y^K, \quad (4.2)$$

где κ_y^T – продольная компонента теоретической кривизны центральной образующей,

κ_y^K – подлежащая компенсации продольная компонента кривизны, формируемая операциями ДУФ, зачистки и ДУУ.

$$\kappa_y^K = \kappa_y^{\text{ДУФ}} + \kappa_y^{\text{зач}} + \kappa_y^{\text{уир}}. \quad (4.3)$$

В данных выражениях положительным является направление поперечной кривизны теоретического контура.

УП процесса гибки представляет набор команд, регулирующих перемещение и скорость подачи обрабатываемой детали, давление в рабочем гидроцилиндре, а также конфигурацию и пространственное положение пуансонов инструментальных блоков.

РО-4. Подготовка УП подгибки утолщений.

Операция подгибки утолщений применяется для образования продольной и поперечной кривизны участков деталей, жёсткость которых не позволяет достичь требуемой кривизны методом ДУФ. Структура УП данной операции аналогична УП образования продольной кривизны.

Методика расчёта параметров гибки на гидропрессе СПП 250М с ЧПУ приведена в работах [70,69].

РО-5. Подготовка УП чернового ДУФ.

Операция чернового ДУФ реализуется на установке УПТ с применением крупной фракции дроби (3-4 мм).

УП процесса чернового ДУФ представляет набор команд, регулирующих частоту вращения ДА и скорость подачи обрабатываемой детали при реализации процесса обработки на установке УПТ.

ТО-1. Образование продольной кривизны детали.

Реализуется на гидравлическом прессе методом гибки в передвижку в программном режиме управления.

ТО-2. Подгибка утолщенных участков заготовки.

Реализуется на гидравлическом прессе методом гибки в передвижку в программном режиме управления.

ТО-3. Черновое ДУФ для получения поперечной кривизны детали.

Реализуется на УПТ путем обработки дробью наружной поверхности детали в программном режиме управления частотой вращения ДА и скоростью перемещения перемещении детали через рабочую камеру.

КО 2. Контроль формы заготовки (аналогично КО-1).

РО-6. Корректировка БД геометрических параметров обрабатываемых участков по результатам КО-2 (аналогично РО-2).

РО-7. Подготовка УП доводочного ДУФ.

Операция доводочного ДУФ реализуется на установке УКТ с использованием дроби, применяемой в установке УПТ для чернового ДУФ.

УП процесса доводочного ДУФ представляет набор команд, регулирующих частоту вращения, траекторию перемещения и скорость подачи рабочего орган установки УКТ – ДА контактного типа.

УП чистового ДУФ детали, обеспечивающего достижение заданной степени соответствия поперечной кривизны заготовки теоретическому контуру (ТК) детали, разрабатываются на основе массива геометрических параметров РУ, скорректированного с учетом результатов контроля формы заготовки на операции КО-3 и расчетного НДС детали, сформированного на операции чернового ДУФ. Скорость дроби доводочного ДУФ

предпочтительно назначать равной скорости дробы черного ДУФ. Это упростит подготовку УП операции зачистки.

РО-8. Подготовка УП зачистки.

Операция зачистки поверхности детали выполняется в случае ухудшения шероховатости после ДУФ. Назначение операции зачистки в ТП – удаление (срезание) части обработанного дробью поверхностного слоя толщиной $h_{зач} = d_{omn}$ мм, где d_{omn} – максимальная глубина отпечатков дробы.

Исходными данными для разработки УП зачистки является УП черного ДУФ. Методика расчёта параметров процесса зачистки на установках УКТ с ЧПУ приведена в работах [60, 27].

ТО-4. Доводочное ДУФ для получения поперечной кривизны детали.

Реализуется на установке УКТ путем обработки дробью наружной (аэродинамической) поверхности детали в программном режиме управления.

КО-3. Контроль формы заготовки (аналогично КО-1).

Операции КО-3, ТО-4 и РО-7 и на этапе отработки технологии повторяются необходимое количество раз с увеличением степени соответствия формы детали ТК до достижения требуемой точности.

ТО-5. Зачистка заготовки.

Операция зачистки лепестковыми кругами реализуется на установке УКТ в программном режиме управления.

КО 4. Контроль формы заготовки (аналогично КО-1).

РО-9. Корректировка БД геометрических параметров обрабатываемых участков по результатам КО-2 (аналогично РО-2).

РО-10. Подготовка УП ДУУ.

УП для ДУУ, обеспечивающая требуемую форму детали, и оптимальные ресурсные характеристики материала, формируется таким образом, чтобы обеспечить сохранение поперечного контура за счет назначения режимов двухсторонней дробеобработки детали с учетом результатов контроля (операция КО-4). Искажение продольного контура, обусловленное разными

режимами обработки сторон детали, компенсируется путем внесения в данный контур расчетных компенсирующих изменений на операции ТО-1 образования продольной кривизны детали. Режимы ДУ предварительно оптимизируются по критерию усталостной д

олговечности материала путём проведения усталостных испытаний с учётом влияния технологических операций изготовления детали.

Методика расчёта параметров процесса ДУУ деталей типа пластин с подкреплением с превентивным деформированием приведена в работе [34].

ТО 6. ДУУ заготовки.

Операция ДУУ Реализуется на УПТ мелкой фракцией дроби (0,6-0,8 мм) в программном режиме управления.

Состав технологических операций процесса формообразования панелей с продольным оребрением подобен вышеописанному. Отличие состоит в том, что образование продольной кривизны детали выполняется методом раскатки рёбер роликами на специальной установке с ЧПУ (см. рисунок 1.15). Формообразование сечений деталей, содержащих такие конструктивные элементы, как окантовки люков и поперечные рёбра, осуществляется посредством гибки на гидропрессе. Для этого в ТП вводятся соответствующие операции гибки в передвижку (черновые и чистовые), а также контрольные операции после их выполнения.

В сравнении с технологией свободной гибки в передвижку, используемой в производстве самолётов с длинномерными панелями крыла, центроплана и фюзеляжа показатели предлагаемой технологии можно оценить следующим образом:

- повышение производительности процесса формообразования в 3-4 раза;
- достижение требуемых показателей по точности формы: отклонения от ТК не более 0,5 мм.

В связи с отсутствием в открытой печати информации по трудоёмкости формообразования деталей типа панелей и обшивок экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии определим, используя полученные нами оценочные данные по трудоёмкости формообразования деталей самолёта длиной до 24 м, при (см. таблицу 4.3).

Таблица 4.3 – Расчет экономического эффекта от внедрения автоматизированной технологии формообразования панелей и обшивок

Наименование	Значение базового показателя на производство типовой детали	Значение показателя с применением технологии на производство типовой детали	Показатель эффекта на одну типовую деталь	Базовый показатель на одно изделие	Расчетный показатель на одно изделие
Изготовление комплекта панелей крыла, (14 деталей на изделие)	70 н/ч	17,5 н/ч	52,5 н/ч	980 н/ч	245 н/ч
Изготовление комплекта панелей центроплана (9 деталей на изделие)	25 н/ч	6,25 н/ч	18,75 н/ч	225 н/ч	56,25 н/ч
Изготовление комплекта панелей фюзеляжа (31 деталь на изделие)	22 н/ч	5,5 н/ч	16,5 н/ч	682 н/ч	170,5 н/ч
Итого трудозатраты на производство одного изделия:				1887 н/ч	471,75 н/ч
Итого затраты на производство одного изделия (цена 1-ого н/ч 2500 руб.*)				4 717 500	1 179 375
Экономический эффект на одно изделие				3 538 125	

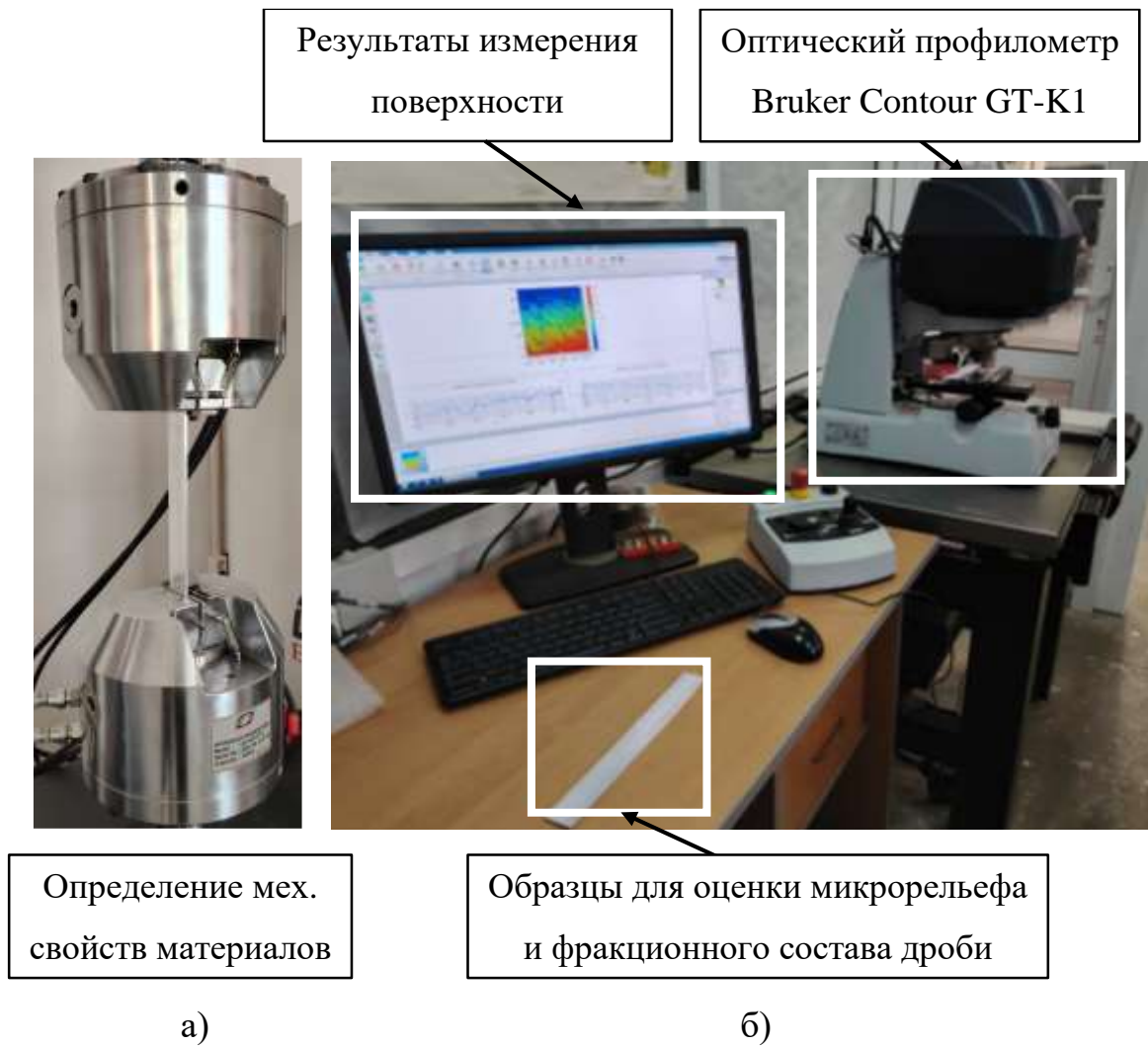
Дополнительный экономический эффект может быть получен за счёт снижения трудоёмкости сборочных работ в связи с повышением точности формы деталей.

4.2 Методика определения параметров процесса ДУФ

Исходными данными для расчёта технологических параметров процесса формообразования, структура которого приведена на рисунке 4.4, являются геометрические параметры детали, содержащиеся в её САД модели, а также тарифовочные параметры технологического оборудования – БД зависимостей эквивалентной нагрузки от режимов и условий обработки. БД формируются для всех материалов обрабатываемых деталей и фракционных составов применяемой дроби и представляют собой набор зависимостей параметров эквивалентной нагрузки (эпюр НН) от времени обработки. Данные зависимости строятся для рабочих диапазонов режимных параметров оборудования – расхода дроби и частоты вращения ДА.

Основные этапы расчета параметров процесса ДУФ:

1. Подготовка образцов для определения:
 - механических свойств материалов [11], см. рисунок 4.5а.
 - фракционного состава дроби и микрорельефа обработанной поверхности см. рисунок 4.5б.
2. Измерение фракционного состава дроби и микрорельефа обработанной поверхности согласно методике, представленной в разделе 2.3. Формирование массива данных диаметров применяемой дроби.
3. Обработка образцов на оборудовании, применяемом для ДУФ, для определения фракционного состава дроби и микрорельефа обработанной поверхности. Режимные параметры обработки образцов назначаются следующим образом: исследуется 5 значений частоты вращения ДА, равномерно распределенных в рабочем диапазоне технологического оборудования. Для каждой частоты вращения назначается 5 значений скоростей подачи, равномерно распределенных в рабочем диапазоне скоростей подачи технологического оборудования. Формирование массива данных параметров микрорельефа обработанной поверхности.



а - определение механических свойств; б - оценка микрорельефа поверхности

Рисунок 4.5 – Подготовка образцов

4. Моделирование процесса ДУФ по методикам, представленным в разделах 2.4 и 2.6 с формированием БД зависимостей кривизны РУ от величины эквивалентной нагрузки и соответствующих режимных параметров процесса.

5. Определение геометрических параметров расчётных участков (РУ) деталей, включающих в себя центр тяжести, момент инерции и стрелы прогиба сечения.

6. Назначение режимов и маршрутов обработки (см. рисунок 4.6).

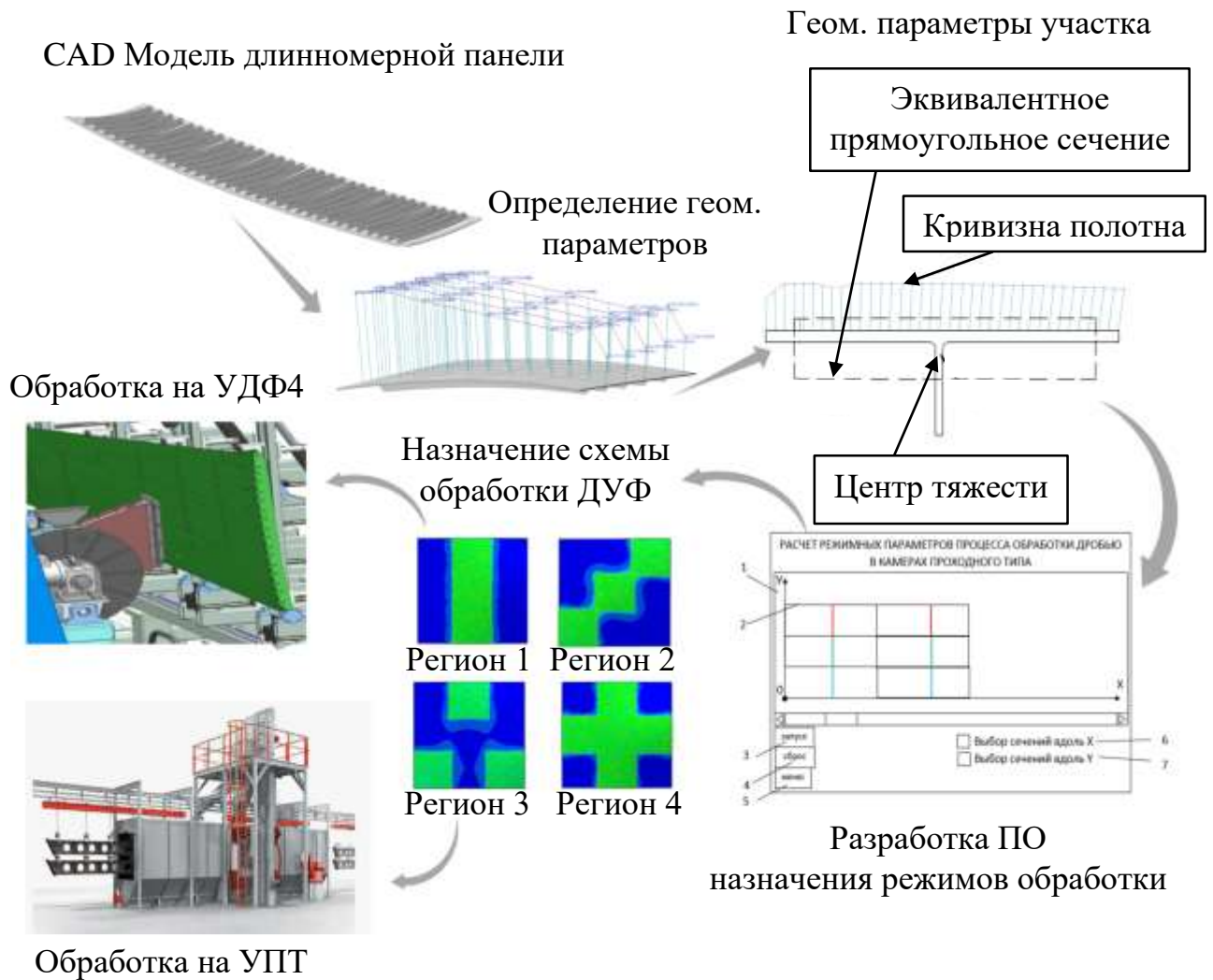


Рисунок 4.6 – Схема назначения режимов ДУФ

Ниже рассмотрены основные подходы к автоматизированному определению геометрических параметров РУ деталей, назначению режимов и маршрутов обработки

4.3 Определение геометрических параметров расчётных участков деталей, подлежащих ДУФ

Методика определения геометрических параметров РУ деталей, формообразование которых осуществляется на УКТ, по 3D моделям деталей включает в себя следующие этапы.

1. Назначение локальной системы координат (СК). При назначении СК деталь необходимо сориентировать поверхностью к пользователю. Располагать СК следует в нижнем левом углу детали (см. рисунок 4.7). Направление осей следующее: ось X – вдоль наиболее длинной линейчатой направляющей (от точки 1 к точке 2) – продольное направление; ось Y – от точки 1 к точке 3 – поперечное направление.

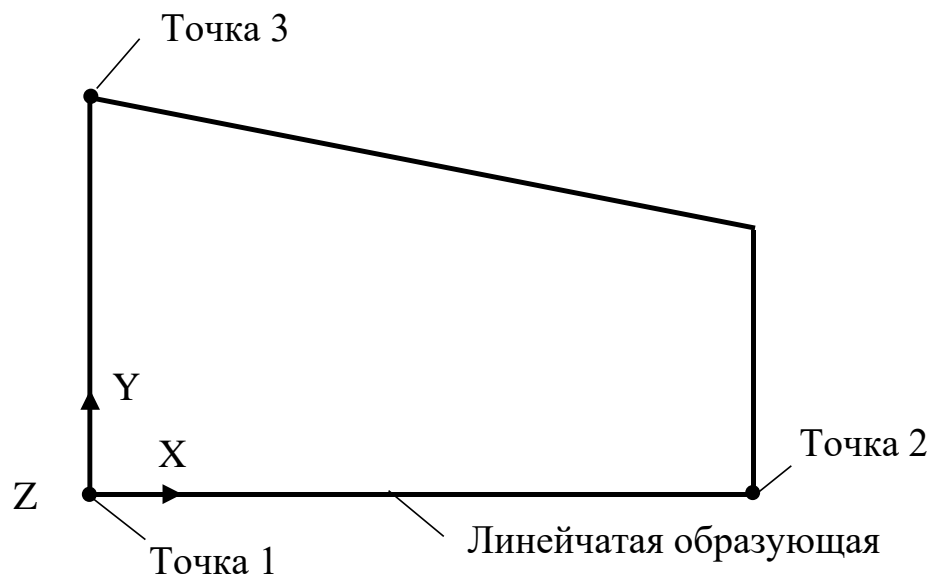


Рисунок 4.7 - Назначение системы координат детали

2. Разбивка детали на расчётные участки (РУ), обрабатываемые с одинаковыми режимами ДУФ (см. рисунок 4.8). Для каждого РУ определяются следующие параметры: средние значения приведенной толщины N_{xij} , N_{yij} ; моменты инерции сечений J_{xij} , J_{yij} ; расстояния от наружной поверхности до центра тяжести сечения z_{xij} , z_{yij} ; стрела прогиба $f_{xij_теор}$, $f_{yij_теор}$.

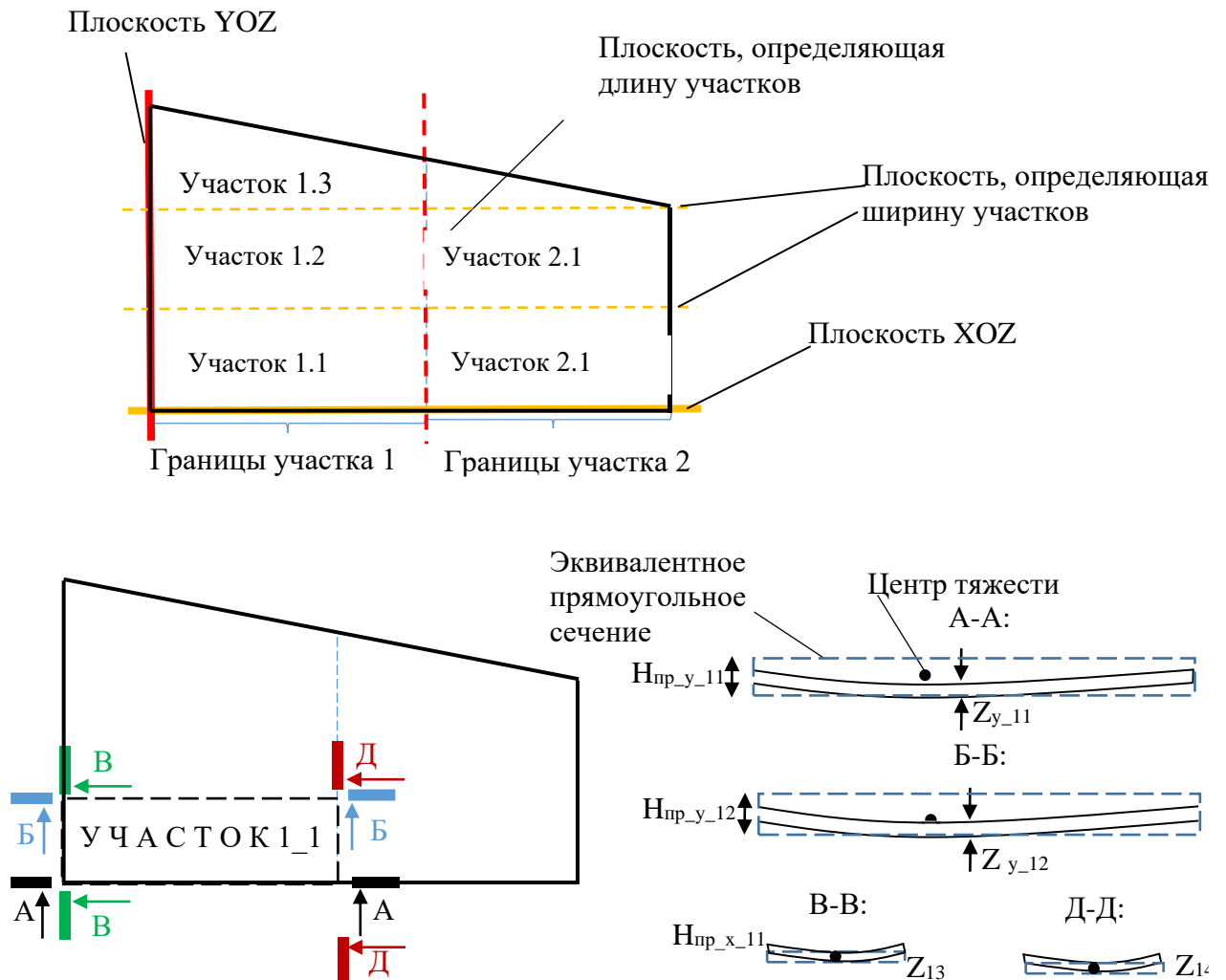


Рисунок 4.8 – Разбивка детали на РУ и определение параметров РУ

Схема обработки детали на операции чернового ДУФ, реализуемой на установке УПТ, приведена на рисунке 4.9.

В ходе реализации операции чернового ДУФ необходимо получить промежуточный контур детали с поперечной кривизной, определяемой как

$$\bar{\kappa}_i^{ДУФ(i)} = k_q \kappa_{i \min}^T, \quad (4.4)$$

где: $\bar{\kappa}_i^{ДУФ(i)}$ – усреднённая поперечная стрела прогиба на базе 200 мм i -го РУ (см. рисунок 4.10), получаемая на черновом этапе ДУФ;

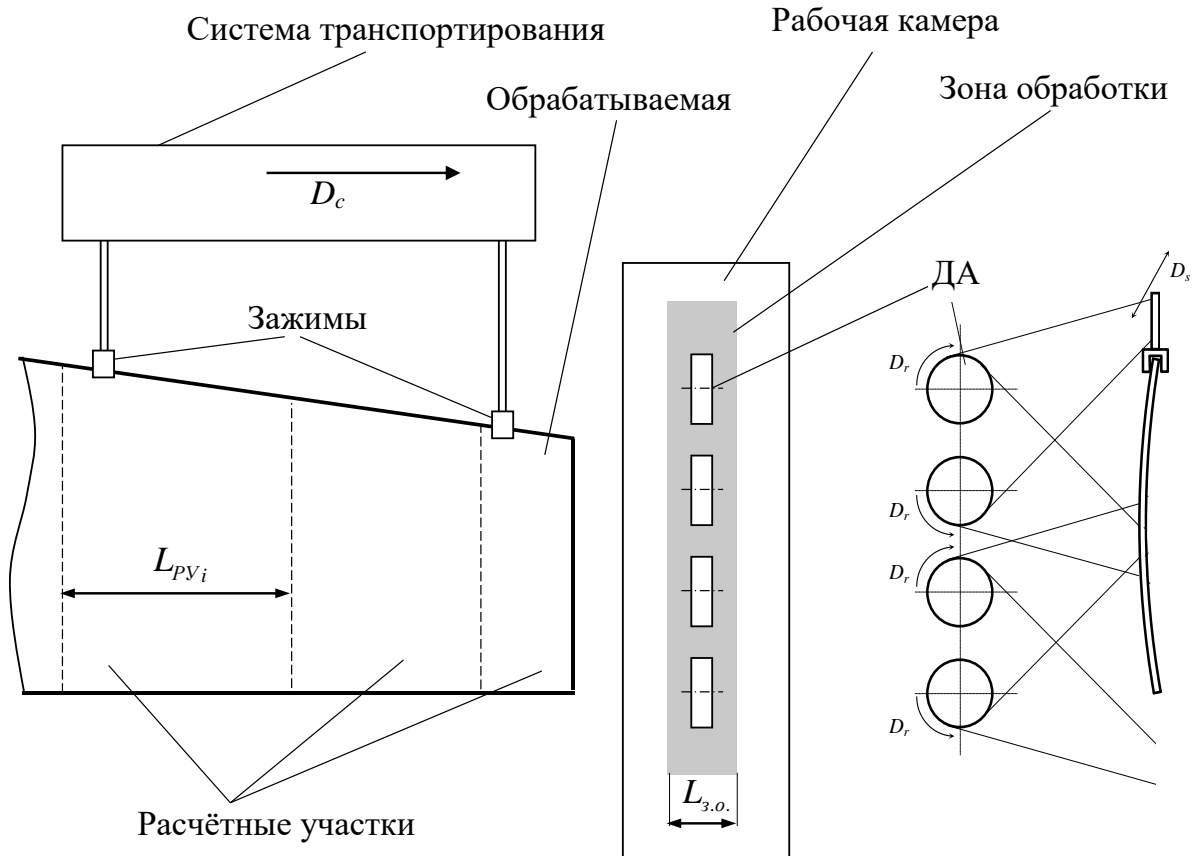


Рисунок 4.9 – Схема черновой обработки деталей на установках УПТ

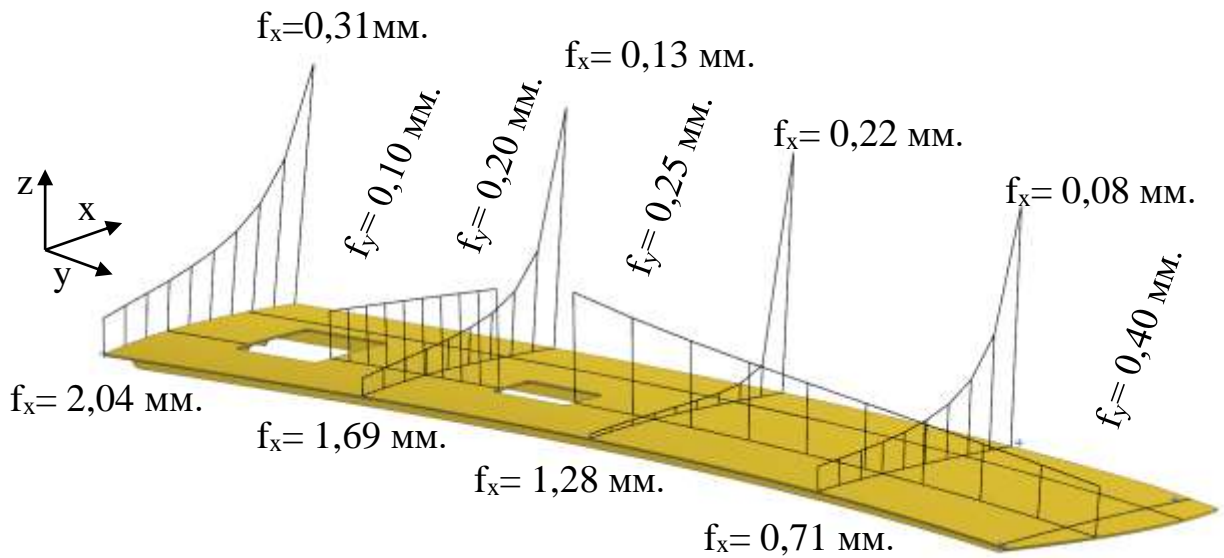


Рисунок 4.10 – Распределение стрелы прогиба на базе 200 мм

$\kappa_{i \min}^T$ – минимальное значение поперечной кривизны теоретического контура (ТК) детали на i -м РУ;

k_q – коэффициент пропорциональности чернового этапа ДУФ.

Величина k_q должна обеспечивать максимальное приближение значений $\kappa_i^{ДУФ(q)}$ и $\kappa_{i \min}^T$ на этапе чернового ДУФ. В связи с тем, что кривизна детали переменна, при выборе режимов обработки РУ принимаем $k_q = 0,5 \dots 0,8$ и выполняем проверочные расчёты с целью исключения превышения значения κ^T в пределах РУ, с доведением k_q до оптимального значения путём регулирования эквивалентной нагрузки процесса ДУФ.

Длина РУ, обрабатываемого с неизменными режимами, определяется следующим образом. Назначим на основе требований к точности формы детали значение k_L отклонения поперечного контура, зависящего от длины РУ (4.5)

$$k_L = \frac{\bar{\kappa}_{x(L_{PY_i})}^T}{\bar{\kappa}_{x(L_{3.o.})}^T} \quad (4.5)$$

где $\bar{\kappa}_{x(L_{PY_i})}^T$ – среднее значение поперечной кривизны ТК на i -м РУ длиной L_{PY_i} ;

$\bar{\kappa}_{x(L_{3.o.})}^T$ – среднее значение поперечной кривизны ТК для РУ, длина которого равна длине зоны обработки установки УПТ $L_{3.o.}$ (см. рисунок 4.9).

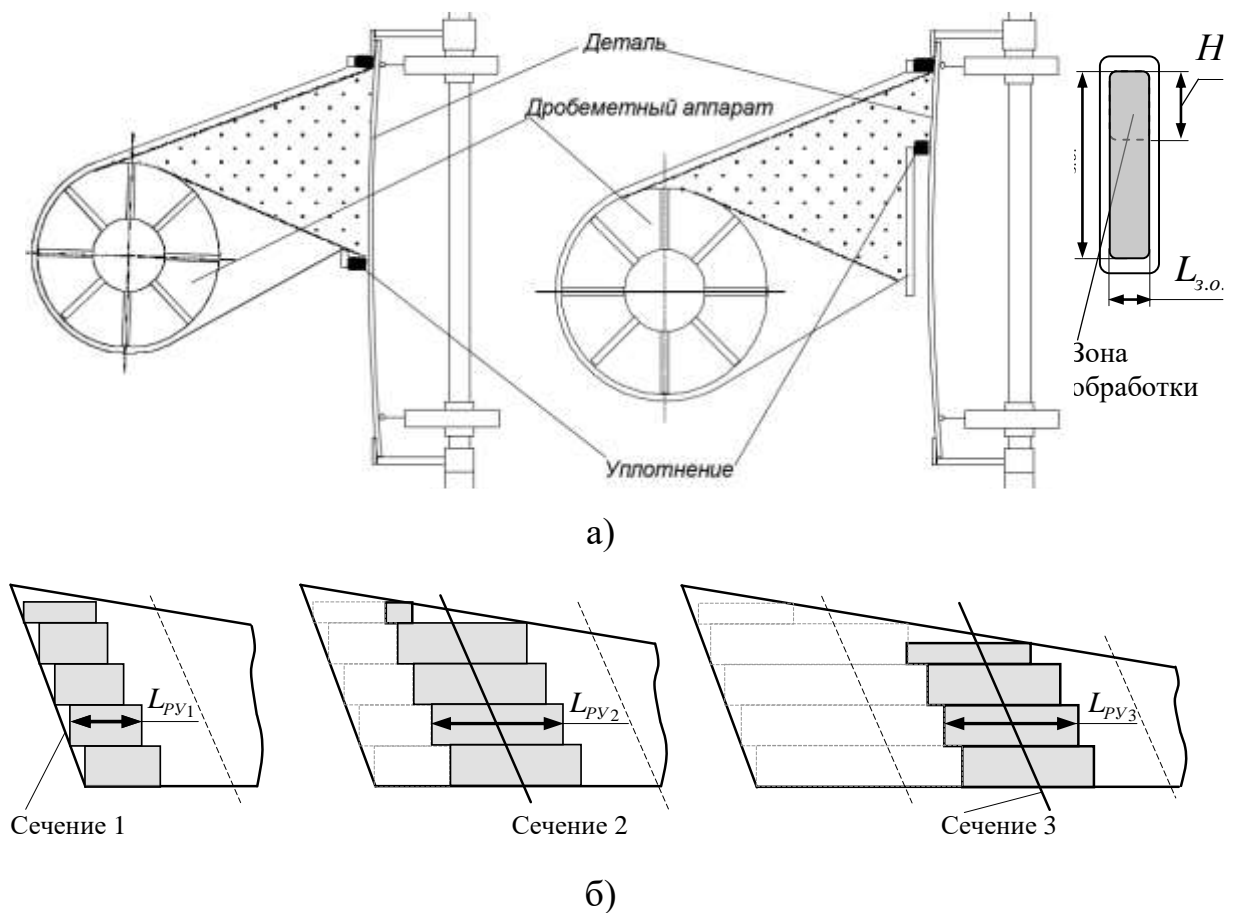
С учётом известной зависимости (см. формулу 4.6), пренебрегая для упрощения расчётов значением координаты z_c центра тяжести эпюры НН, возникающих в процессе ДУФ, которая не превышает 0,2 мм, получаем

$$k_L = \frac{\bar{Z}_{0(L_{PY_i})}}{\bar{Z}_{0(L_{3.o.})}} \left(\frac{\bar{H}_{np(L_{3.o.})}}{\bar{H}_{np(L_{PY_i})}} \right)^3, \quad (4.6)$$

где $\bar{H}_{np(L_{3.o.})}$, $\bar{H}_{np(L_{PY_i})}$, $\bar{Z}_{0(L_{3.o.})}$, $\bar{Z}_{0(L_{PY_i})}$ – средние значения приведённых толщин и координат центров тяжести сечений РУ с длинами $L_{3.o.}$ и L_{PY_i} .

Длина L_{PY_i} i -го РУ вычисляется путём решения уравнения (4.5) при заданном значении k_L с постепенным увеличением L_{PY} .

Схема обработки детали на операции доводочного ДУФ, реализуемой на установке УКТ, приведена на рисунке 4.11.



а - схема обработки на УКТ; б - длина РУ

Рисунок 4.11 – Схема доводочной обработки деталей на установках УКТ

Размеры РУ, обрабатываемых с неизменными режимами, – высота H_{PY} и длина L_{PY} , на доводочном этапе ДУФ определяются с использованием подхода, применённого при нахождении длины РУ черновой операции ДУФ.

Длину РУ определим по формуле (4.5).

Высоту РУ H_{PY} найдём, назначая на основе требований к точности формы детали значение отклонения k_H поперечного контура детали, зависящее от высоты РУ (4.7),

$$k_H = \frac{\bar{K}_{x(H_{PYi})}^T}{\bar{K}_{x(H_{3.o.}^{\min})}^T} \quad (4.7)$$

Используя выражение (4.6), получаем

$$k_H = \frac{\bar{Z}_{0(H_{PYi})}}{\bar{Z}_{0(H_{3.o.}^{\min})}} \left(\frac{\bar{H}_{np(H_{3.o.}^{\min})}}{\bar{H}_{np(H_{PYi})}} \right)^3, \quad (4.8)$$

где $\bar{H}_{np(H_{3.o.}^{\min})}$, $\bar{H}_{np(H_{PYi})}$, $\bar{Z}_{0(H_{3.o.}^{\min})}$, $\bar{Z}_{0(H_{PYi})}$ – средние значения приведённых толщин и координат центров тяжести сечений РУ с высотами $H_{3.o.}^{\min}$ и H_{PYi} соответственно.

Высота H_{PYi} i -го РУ вычисляется путём решения уравнения (4.7) при заданном значении k_H с перебором высот полос обработки ДА установки УКТ, определяемых размерами применяемых уплотнений.

Цель доводочного этапа ДУФ – получение поперечной кривизны $\bar{\kappa}_i^{ДУФ(\delta)}$ РУ, соответствующей ТК (4.9)

$$\bar{\kappa}_i^{ДУФ(\delta)} = k_d \bar{\kappa}_i^T, \quad (4.9)$$

где: $\bar{\kappa}_i^T$ – среднее значение теоретической поперечной кривизны на i -м РУ;

k_d – коэффициент пропорциональности доводочного этапа ДУФ.

Величина $k_d = 0,9, \dots, 1,0$ назначается из условия исключения превышения значения k^T в пределах РУ.

Блок схема функционирования программного модуля для автоматического определения геометрических параметров РУ по 3D-модели детали приведен на рисунке 4.12.

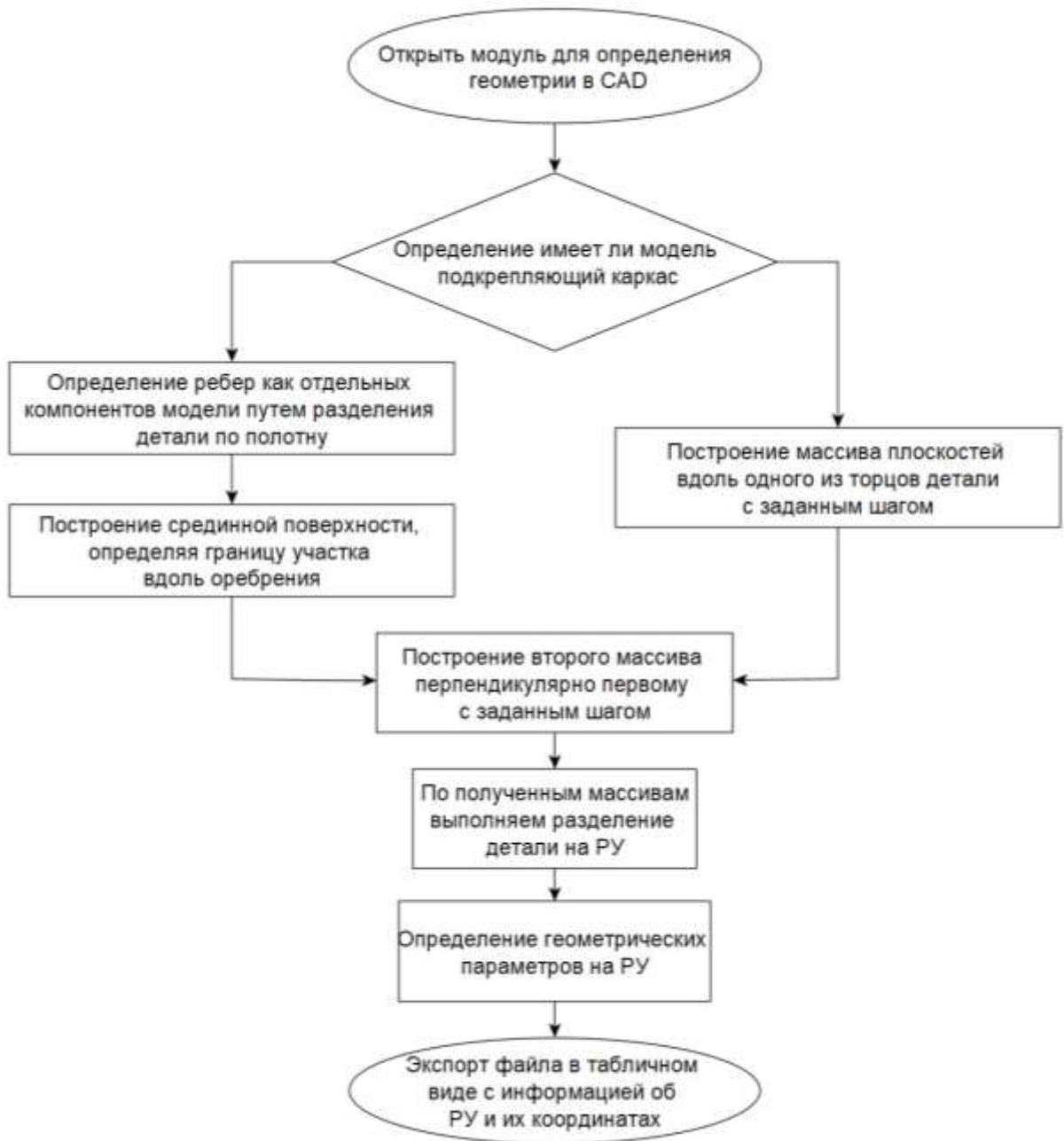


Рисунок 4.12 – Блок схема работы программного модуля для определения геометрических параметров РУ по 3D-модели детали

Алгоритм использования разработанного ПО для автоматического определения геометрических параметров РУ деталей в программной среде Siemens NX12 подразумевает следующую последовательность действий (см. рисунок 4.13). Листинг программного кода приведен в приложении Д.

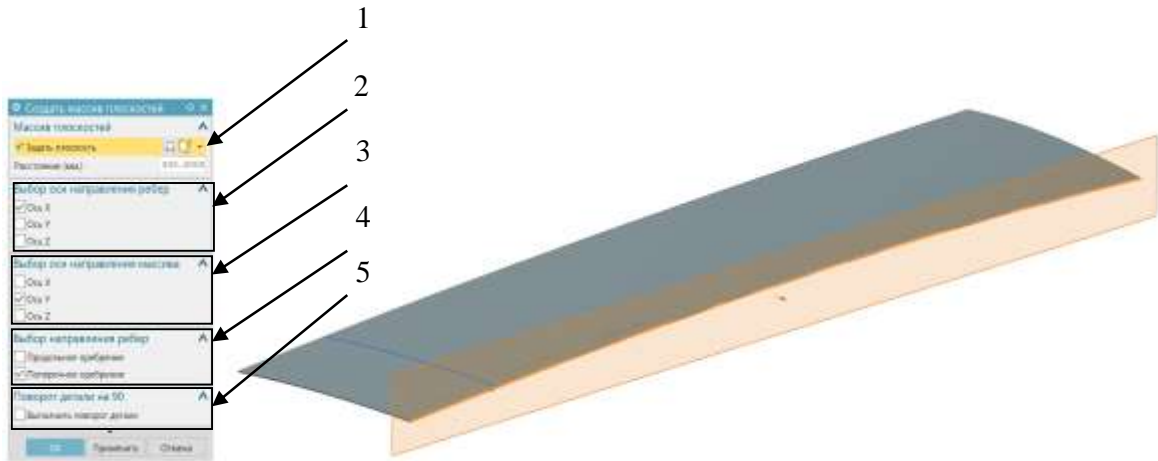


Рисунок 4.13 – Построение массива плоскостей перпендикулярно линии построения ребер

1. Ориентация базовой плоскости для формирования массива плоскостей, определяющих длину РУ.

2. Определение направления главных осей относительно конструктивных элементов детали.

3. Установление направления формирования массива плоскостей перпендикулярно рёбрам детали.

4. Классификация типа оребрения (продольное или поперечное).

5. При необходимости доступна функция поворота детали на 90 градусов для повышения удобства взаимодействия с моделью. В качестве базовой поверхности для массива выступает боковая поверхность детали.

6. Отделение силового набора детали от полотна. Операция разделения позволяет в автоматическом режиме определить количество ребер, а также срединную поверхность каждого ребра при помощи операции «Разсечение детали» (см. рисунок. 4.14).

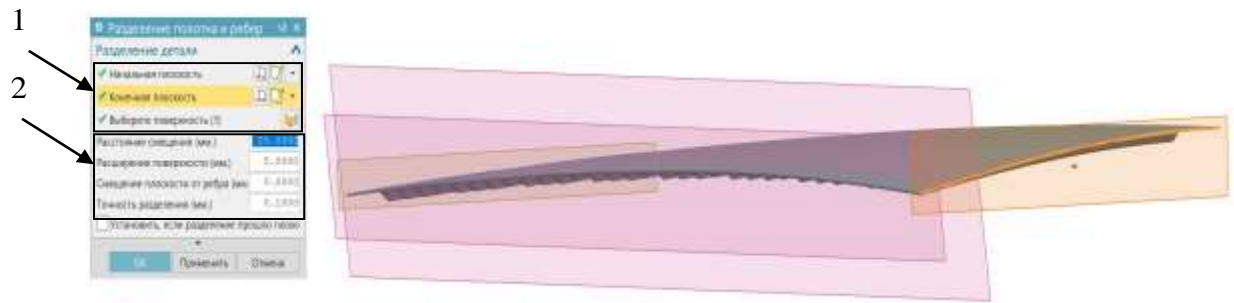


Рисунок 4.14 – Разделение модели на полотно и силовой набор

6. Разделение модели детали на РУ в соответствии с построенными ранее плоскостями с помощью операции «Определение РУ модели» и определение параметров эквивалентного прямоугольного сечения (моменты инерции, центр тяжести, толщина сечения) в продольном и поперечном направлениях для каждого РУ (см. рисунок 4.15).

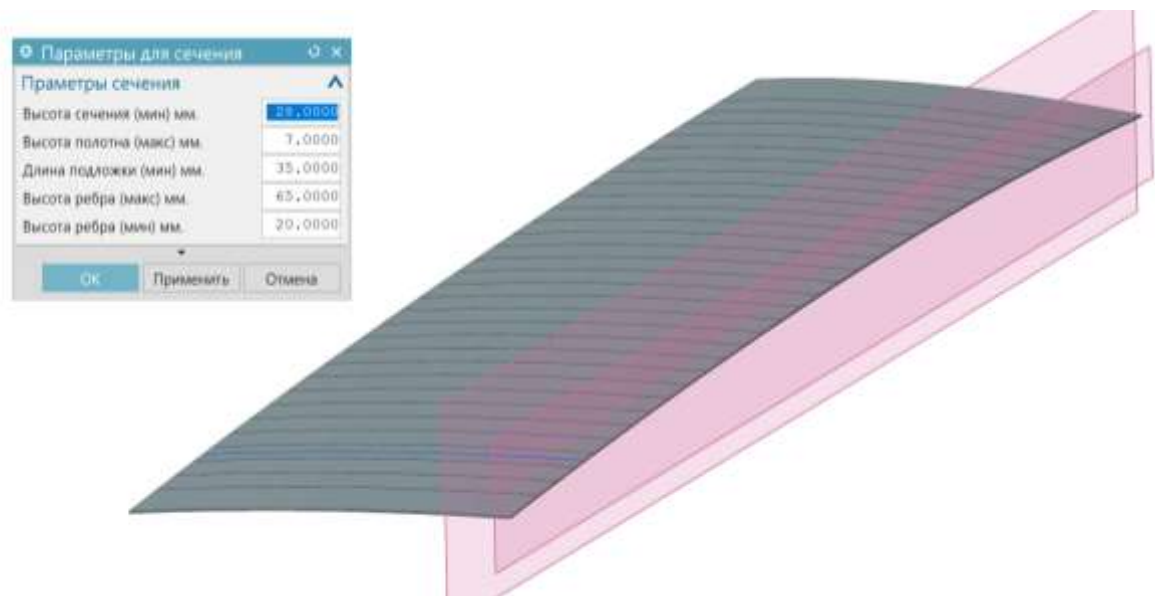


Рисунок 4.15 – Определение геометрии РУ

Определение геометрических параметров РУ на основе универсального алгоритма. В качестве классифицирующих параметров выступают:

- высота сечения;
- толщина полотна;
- длина подложки в оресбренном пространстве;

- высота ребра (максимальная и минимальная).

Аналогичный подход использовался для определения сечения в поперечном направлении (см. рисунок 4.16).

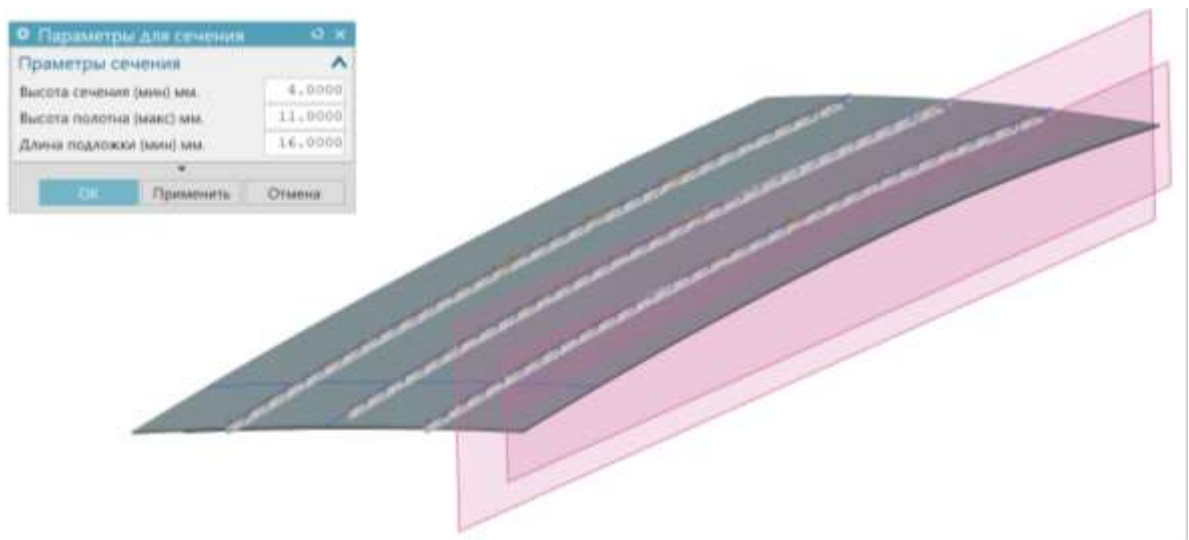


Рисунок 4.16 – Определение геометрии прямоугольного сечения

В данном случае сечение имеет вид прямоугольника. В качестве определяющих характеристик выступают:

- высота сечения;
- толщина полотна.

В результате работы дополнительного программного модуля для САД системы в автоматическом режиме определяется продольное и поперечное сечение в детали, а также его размеры. Следующий этап включает в себя определение стрелы прогиба относительно главных осей X и Y (см. рисунок 4.17 и 4.18).

Финальное действие – формирование двух файлов «.xlsx» и «.csv». Файл «.xlsx» открывается в автоматическом режиме после завершения работы программы, что позволяет сразу же оценить полученные результаты по геометрии любого из РУ детали. Файл «.csv» необходим для загрузки геометрических параметров в программный модуль расчета режимных параметров процесса ДУФ.

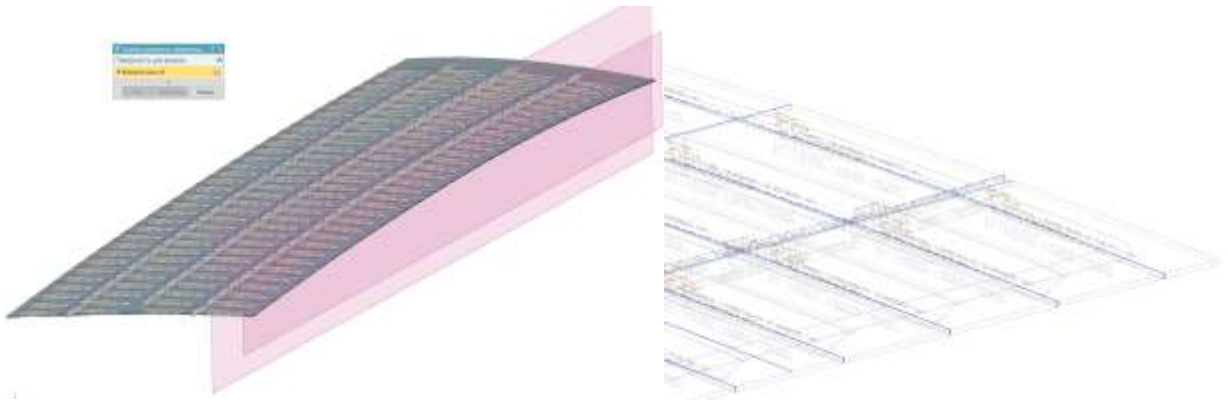


Рисунок 4.17 – Построение сечений

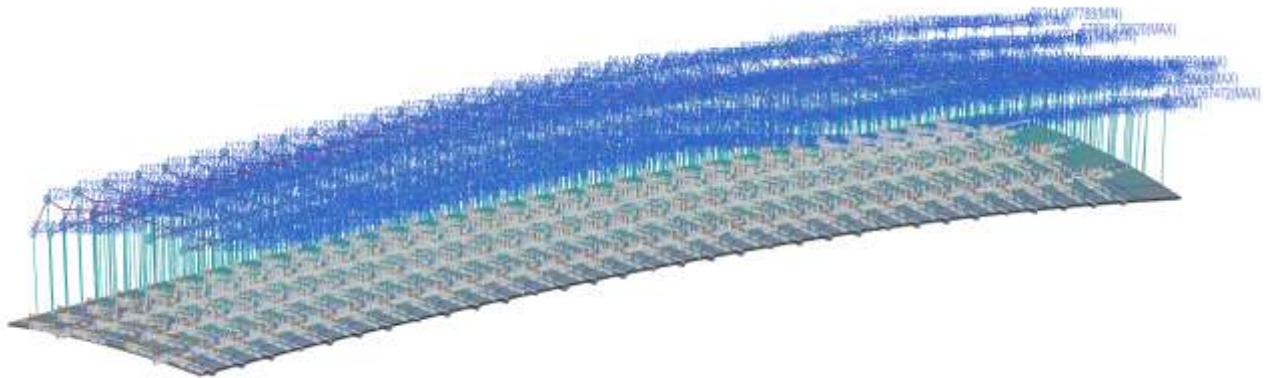


Рисунок 4.18 – Построение кривизны в продольном и поперечном контуре

На основе определённых геометрических параметров для каждого РУ составляется полиномиальное уравнение, которое описывает зависимость между кривизной РУ и НН, создаваемыми при ДУФ. Это уравнение учитывает геометрические и физические характеристики КЭМ, позволяя прогнозировать изменение кривизны РУ при обработке. Фрагмент БД, связывающей геометрические параметры и стрелу прогиба РУ с начальными напряжениями, формируемыми при ДУФ приведён в приложении В.

В дальнейшем, при проведении эмпирических исследований, БД будет дополняться режимами обработки для определения взаимосвязей между теоретическими и экспериментальными результатами.

4.4 Методика расчета режимных параметров процесса ДУФ

Методика расчета режимных параметров процесса ДУФ с использованием разработанной БД и подходов МО схематично представлена на рисунке 4.19.

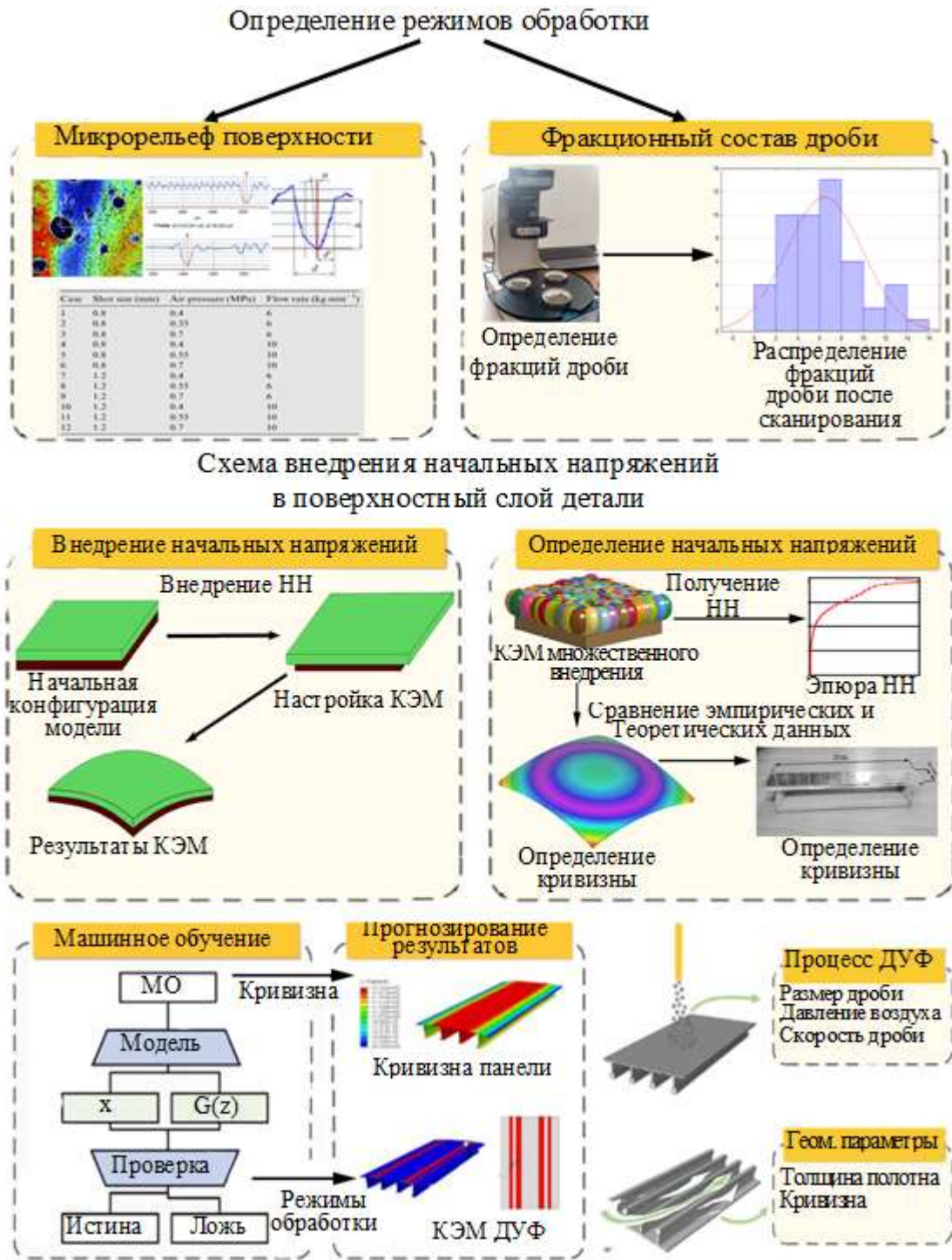


Рисунок 4.19 – Схема к расчёту режимов обработки процесса ДУФ

Алгоритм МО на основе «дерева решений» используется для решения задач классификации и регрессии, представляя собой графическую модель, в которой каждое решение принимается на основе последовательных вопросов о признаках данных (см. рисунок 4.20).

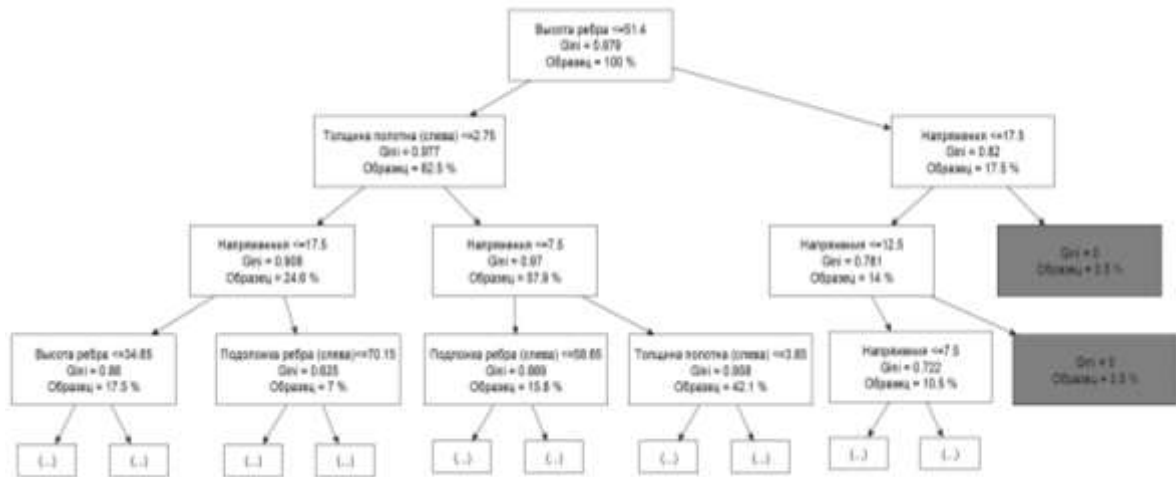


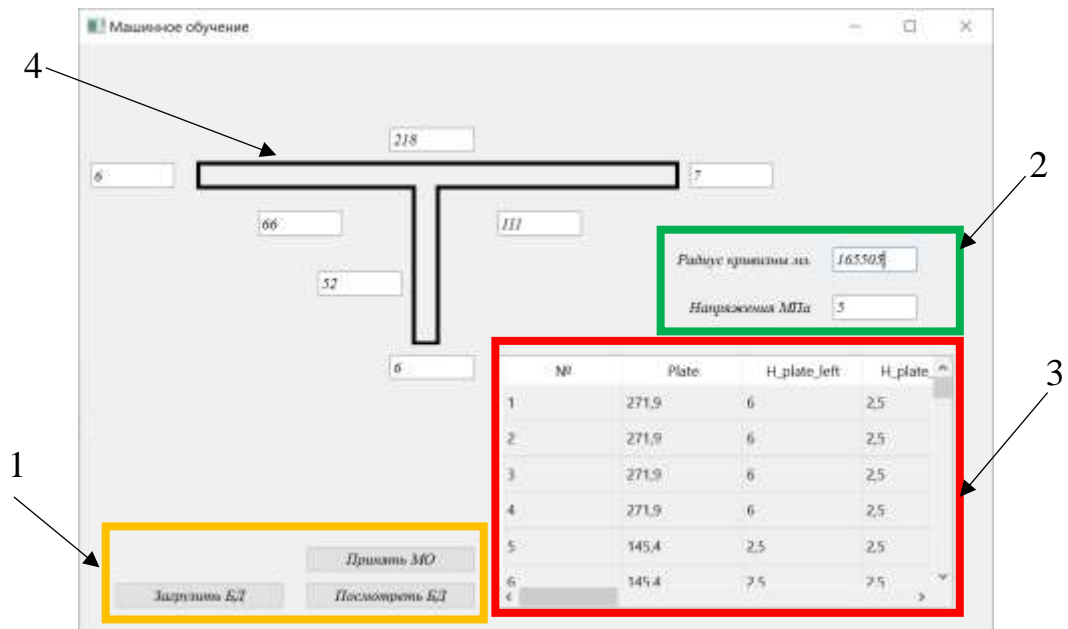
Рисунок 4.20 – Модель дерева решений

Одной из характеристик для обучения модели является шаг изменения эквивалентной нагрузки для одного типоразмера сечений РУ. Более мелкий шаг позволяет более точно предсказать поведение участка детали. Схема обучения модели показана на рисунке 4.21.

Для назначения режимных параметров ДУФ с использованием МО было разработано ПО, взаимодействующее с БД (см. приложение В). Интерфейс ПО приведен на рисунке 4.22. При нажатии кнопки «Загрузить БД» инициируется загрузка БД. Кнопка «Посмотреть БД» открывает загруженную БД в интерфейсе программы. Загруженная таблица доступна для редактирования и добавления новых значений. При активации кнопки «Принять МО» запускается процесс работы модели МО, основанной на методе «дерево решений» (см. рисунок 4.20), предназначенный для прогнозирования результатов обработки в соответствии с параметрами, введенными пользователем в окне указания размеров РУ.



Рисунок 4.21 – Обучение модели для определения режимов обработки



1 – элементы управления, обеспечивающие взаимодействие с БД и функциональность МО; 2 – интерфейс для отображения режимов обработки после МО; 3 – окно для визуализации базы данных, предназначенное для просмотра и редактирования информации; 4 – ввод значений для РУ

Рисунок 4.22 – Графический интерфейс программы МО

Для повышения точности прогнозирования использовались два набора данных: тренировочный и тестовый. Отношение данных внутри модели составляет 1 к 5 соответственно. Тренировочные данные используются для обучения модели, что позволяет ей выявлять закономерности и зависимости. Тестовые данные, напротив, служат для оценки производительности модели на новых, ранее не встречавшихся данных, что помогает определить её способность к обобщению. Разделение данных предотвращает переобучение, при котором модель запоминает обучающие данные вместо того, чтобы выполнять прогнозирование. Данная особенность обеспечивает более объективную оценку качества модели, так как тестовые данные не участвуют в процессе обучения.

4.5 Разработка управляющих программ (УП) процесса ДУФ

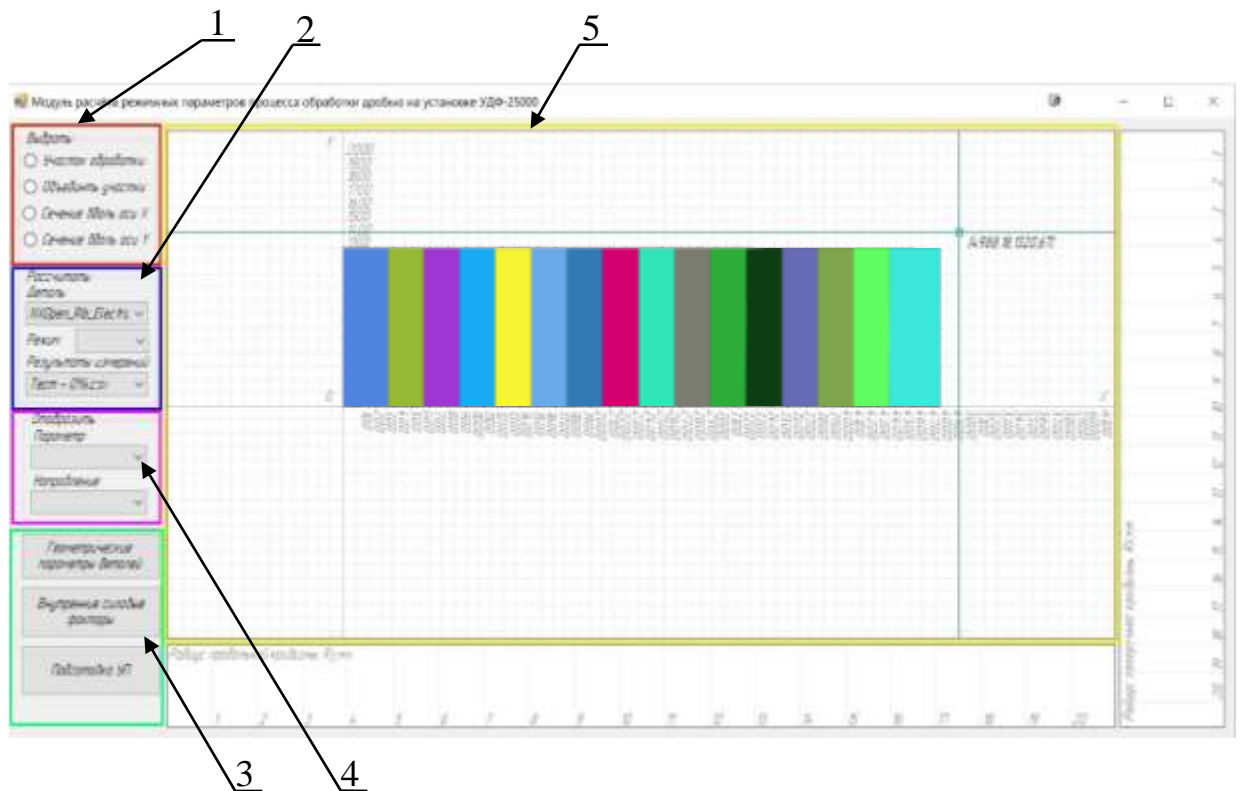
На основе методик, описанных в разделах 4.1-4.3, было разработано ПО для назначения режимов и маршрутов обработки и составления УП для установок УПТ и УКТ. Листинг программного кода приведен в приложении Ж.

Входными данными для работы ПО являются:

- массив данных РУ, входящих в состав детали, полученный на основе 3D модели детали и позволяющий визуализировать двумерное изображение детали;
- БД зависимости эквивалентной нагрузки и геометрических параметров РУ.

Интерфейс разработанного ПО назначения маршрутов обработки операций ДУФ представлен на рисунке 4.23.

Рабочая область 1 обеспечивает отображение детали, разбитой на РУ. Предусмотрена возможность выбора отдельных РУ для получения общей информации о сечении с опцией редактирования полученных данных.



1 – Выбор параметра для анализа детали; 2 – Выбор детали и режимных параметров обработки; 3 – Выбор отображаемых параметров детали; 4 – Выбор деталей с РУ и вывод УП; 5 – Рабочая область с отображением 2d CAD детали (вид сверху)

Рисунок 4.23 – Главное окно программы назначения маршрутов обработки операции ДУФ

Область 2 обеспечивает выбор одного из четырёх параметров для анализа детали. Первый режим предназначен для выбора РУ, второй – для визуализации полос обработки, третий и четвертый – для оценки полос обработки в направлениях X и Y соответственно. В области 3 осуществляется выбор детали и режимов обработки. Область 4 предназначена позволяет визуализировать необходимые данные для каждого РУ, соответствующие направлению по осям X или Y.

Интерфейс разработанного ПО разработки УП операций ДУФ на автоматизированном оборудовании представлен на рисунке 4.24.

1 – Параметры УП на оборудовании УПТ; 2 - Параметры УП на оборудовании УКТ;
 3 – Исходное значение контура детали перед обработкой 4 – Дополнительные свойства материала детали для составления УП

Рисунок 4.24 – Интерфейс разработанного ПО разработки УП операций ДУФ на автоматизированном оборудовании

Разработка УП осуществляется в следующей последовательности.

1. Загрузка массива данных участков, входящих в состав детали и полученных по САД модели при помощи функции «Геометрические параметры деталей».

2. Разработка УП черного формообразования для установок УПТ. Вызвать функцию «Внутренние силовые факторы» (см. рисунок 4.24, поз. 1), указать характеристики оборудования и загрузить БД для УПТ.

2.1. Полосы обработки будут окрашены в определённые цвета, каждый из которых соответствует конкретному режиму обработки и зависит от кривизны в выбранной области.

2.2. Через меню «Подготовка УП» осуществляется формирование выходного файла в формате G-code для УПТ. Кроме того, предусмотрена возможность ручного изменения режимов обработки.

3. Разработка УП доводочного формообразования для установок УКТ (см. рисунок 4.28, поз. 2). Вызвать функцию «Внутренние силовые факторы», указать характеристики оборудования, загрузить БД для УКТ.

3.1. На участках представлены линии, иллюстрирующие стратегию обработки на УКТ. Дополнительно возможно определение параметров стратегий обработки в зависимости от типов РУ обрабатываемой детали.

3.2. Через меню «Подготовка управляющей программы» осуществляется генерация выходного файла в формате G-code для УКТ. При необходимости оператор имеет возможность вручную изменять параметры и координаты обработки для каждого отдельного участка.

4. Исходный контур детали, подлежащей ДУФ, может иметь отклонения от заданной геометрической формы, возникающие в результате предыдущих этапов механической обработки. Для учета этих исходных отклонений предлагается использовать набор коэффициентов, предназначенных для оценки предсказания формы (см. рисунок 4.24, поз. 3). Данная опция реализуется через интегрированную в состав установки УКТ измерительную систему (ИС), которая обеспечивает определение координат контрольных точек на наружной (аэродинамической) поверхности заготовки. Программное обеспечение ИС выполняет «оцифровку» полученного в процессе измерений массива координат точек и формирует 3D модель поверхности детали.

5. В расчетах также учитываются механические свойства материала детали, определение которых подробно изложено в разделе 2.2

Вводы по главе 4

1. Разработаны и обоснованы рекомендации по организации серийного автоматизированного производства крупногабаритных обводообразующих деталей на оборудовании с ЧПУ. Задачу повышения производительности предложено решить путём разделения технологического процесса ДУФ на операции черновой обработки на высокопроизводительной установке проходного типа (УПТ) с получением промежуточного контура детали с постоянной поперечной кривизной и доводочной обработки на установке контактного типа (УКТ) до достижения требуемой точности формы. Сформулированы основные требования к применяемому оборудованию и содержанию технологических операций.

2. На основе разработанных в главе 2 методов моделирования процесса ДУФ разработано ПО с использованием машинного обучения (МО), автоматизирующее процесс определения формоизменения расчётных участков (РУ) обрабатываемых деталей под действием эквивалентной нагрузки (ЭН) в виде начальных напряжений (НН) и деформаций, зависящих от режимов ДУФ.

3. Разработано специальное ПО для автоматизированного получения из САД модели детали необходимых для расчета режимов обработки при ДУФ геометрических параметров РУ: приведенной толщины, моментов инерции и координат центров тяжести сечений, стрелы прогиба продольной и поперечной кривизны.

4. Созданы методики и ПО для определения параметров процесса ДУФ, предусматривающие

- калибровку оборудования (УПТ и УКТ) путём определения фракционного состава применяемой дроби и параметров микрорельефа обработанной поверхности, зависящих от режимов обработки с формированием соответствующих баз данных БД;

- формирование БД зависимостей кривизны типовых РУ деталей от

ЭН, соответствующей режимам и условиям ДУФ;

- назначение на основе БД режимов и маршрутов ДУФ конкретных деталей и составления управляющих программ для черного ДУФ, реализуемого на УПТ, и чистовой (доводочной) обработки с использованием УКТ.

Заключение

Результаты, представленные в диссертационной работе, были получены при исполнении договора от 23.08.2022 г. № 56/22 на выполнение научно-исследовательских и опытно-технологических работ (НИОТР) на тему: «Разработка комплексной технологии формообразования-упрочнения длинномерных панелей и обшивок», заключенного в рамках создания на Филиале АО «Туполев» – Казанском авиационном заводе им. С.П. Горбунова автоматизированной линии формообразования, зачистки и упрочнения длинномерных панелей и обшивок.

Акт использования результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ приведён в приложении Г.

В рамках выполнения НИОТР созданы новые научно обоснованные технологические решения, обеспечивающие повышение производительности, точности и качества процесса дробеударного формообразования (ДУФ) крупногабаритных обводообразующих деталей. При этом получены следующие научные выводы и практические результаты:

1. Решён комплекс вопросов, направленных на совершенствование методики расчёта эквивалентной нагрузки (ЭН) – интегральной характеристики воздействия потока дроби на деталь в виде распределений начальных напряжений (НН) и деформации в поверхностном слое. Использование ЭН при конечно-элементном моделировании (КЭМ) процесса дробеударного формообразования (ДУФ) позволяет определить формоизменение реальных обводообразующих деталей, представляющих совокупность расчётных участков (РУ) с переменными геометрическими параметрами, позволяет добиться значительной экономии вычислительных ресурсов и повышения адекватности расчётов за счёт исключения принятия допущений, связанных с определением сосредоточенной силы и координаты точки её приложения.

2. Предложен метод определения необходимых при расчёте ЭН параметров микрорельефа обработанной поверхности, содержащего отпечатки различных диаметров и зависящего от режимов ДУФ, особенностей применяемого оборудования и фракционного состава дробы. Метод основан на автоматизированном анализе полученных с применением 3D-оптического профилометра изображений с применением машинного обучения (МО), где для разделения пикселей изображения на кластеры по цвету использована модель гауссовых смесей и библиотека OpenCV компьютерного зрения.

3. Расчёт ЭН процесса ДУФ реализован методом КЭМ процесса множественного внедрения дробы в закреплённую пластину с автоматической подготовкой расчетного файла со случайной генерацией координат и скоростей соударения на основе известных режимов обработки, параметров фракционного состава дробы и микрорельефа обработанной поверхности. Исходные данные для расчёта оформлены в виде БД, представляющей совокупность полиномиальных зависимостей диаметра и глубины отпечатков от скорости дробы рабочего диапазона, полученных путём КЭМ процессов единичных внедрений дробы в материал детали.

4. Разработана методика КЭМ с целью прогнозирования формоизменения при ДУФ расчётных участков (РУ) деталей конечных размеров с использованием в качестве ЭН эпюр НН и деформаций, внедряемых в поверхностный слой детали. Показано, что можно выполнять на РУ, обрабатываемых с одинаковыми режимами, без учёта влияния соседних РУ и последовательности обработки детали в целом. Разработано ПО с использованием МО, автоматизирующее процесс определения формоизменения расчётных участков (РУ) обрабатываемых деталей под действием ЭН.

5. Созданы методики и специальное ПО для определения параметров процесса ДУФ, обеспечивающее

- автоматизированное получение из CAD модели детали

необходимых для расчета режимов обработки при ДУФ геометрических параметров РУ: приведенной толщины, моментов инерции и координат центров тяжести сечений, стрелы прогиба продольной и поперечной;

- калибровку оборудования для ДУФ путём определения фракционного состава применяемой дроби и параметров микрорельефа обработанной поверхности, зависящих от режимов обработки с формированием соответствующих БД;

- формирование БД зависимостей кривизны типовых РУ деталей от ЭН, соответствующей режимам и условиям ДУФ;

- назначение на основе БД режимов и маршрутов ДУФ конкретных деталей и составления управляющих программ для реализации черновой и доводочной операций ДУФ на оборудовании с ЧПУ.

6. В ходе проведённых численных и экспериментальных исследований доказана применимость и высокая эффективность разработанных методик и ПО.

7. Разработаны и обоснованы рекомендации по организации серийного автоматизированного производства крупногабаритных обводообразующих деталей на оборудовании с ЧПУ. Задачу повышения производительности предложено решить путём разделения технологического процесса ДУФ на операции черновой обработки на высокопроизводительной установке проходного типа с получением промежуточного контура детали с постоянной поперечной кривизной и доводочной обработки на установке контактного типа до достижения требуемой точности формы. Сформулированы основные требования к применяемому оборудованию и содержанию технологических операций.

Перспективы дальнейших исследований:

- Создание нейросетевых моделей, позволяющих по требуемой итоговой форме детали и известным характеристикам оборудования автоматически

подбирать оптимальные режимы ДУФ (скорость, расход дроби, время обработки, траектория обработки) без итерационного моделирования.

- Разработка модуля для сквозного CAE/CAM-цикла: от CAD-модели детали до генерации управляющих программ для оборудования с ЧПУ с обратной связью по результатам промежуточного контроля геометрии.

- Совершенствование методов промежуточного контроля формы с учетом влияния способов закрепления и силы собственного веса детали.

Список литературы

1. Абрамов, В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. – М.: Машиностроение, 1963. – 355 с.
2. Андрияшина, Ю.С. Автоматизированный расчет технологических параметров дробеударного формообразования крупногабаритных панелей / Ю.С. Андрияшина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. №6 (2). С. 305-308.
3. Баскаков, С.Т. Формообразование длинномерных панелей / С.Т. Баскаков, Ю.С. Пилякин // Авиационная промышленность. 1987. №10. С.3-4.
4. Белов, М.И. Эффективность использования математического моделирования при исследовании, оптимизации и проектировании технологических процессов ОМД / М.И. Белов // Пластическая деформация сталей и сплавов. Москва: Московский государственный институт стали и сплавов. 1996. С. 224-227.
5. Биргер, И.А. Остаточные напряжения. / И.А. Биргер // М.: Машгиз, 1963. 232с.
6. Васильков, С.Д., Александров А.С., Афанасьев И.В. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из алюминиевого сплава после механической обработки // Инструмент и технологии, № 30-31, 2009. С. 83-85
7. Вепрев, А.А. Автоматизация производства длинномерных панелей и обшивок на иркутском авиационном заводе / А.А. Вепрев // Наука и технологии в промышленности. – 2013. – № 1–2. – С. 53–56.
8. Вепрев, А.А. О создании отраслевой технологии дробеударного формообразования панелей / А.А. Вепрев, А.Е. Пашков, В.В. Плихунов, Ю.С. Румянцев, А.В. Сергунов // Авиационная промышленность. 2009. № 2. С. 24-29.
9. Викулова, С.В. Повышение эффективности формообразования – упрочнения оребренных панелей: Автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. / С.В. Викулова. Иркутск, 2011. 20 с.

10. Гомульчик, П.М. Упрочнение рессорных листов в предварительно напряженном состоянии / П.М. Гомульчик // Пути улучшения качества и долговечности автомобильных рессор: Сб. научн. тр. – М.: ЦНИИТМАШ, 1973. – С. 45-52.
11. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Москва: Издательство стандартов, 1984. – 32 с.
12. ГОСТ 3722-2014. Подшипники качения. Шарики стальные.
13. Гребенников, Д.С. Формообразование панелей крыла дальнемагистрального самолета / Д.С. Гребенников, В.И. Максименков // Вестник ВГТУ. 2019. №1.
14. Давиденков, Н.Н. Об остаточных напряжениях // Заводская лаборатория. – 1935. – № 6. – С. 688-693.
15. Дияк, А. Ю. Система автоматизированной подготовки управляющих программ формообразования листовых деталей на контактных дробеметных установках с ЧПУ: диссертация кандидата технических наук : 05.02.08. - Иркутск, 2005. - 201 с.
16. Дияк, А.Ю. Определение степени покрытия автоматизированным методом / А.Ю. Дияк // Вестник ИрГТУ. 2015. №12 (107).
17. Дияк, А.Ю. Система автоматизированной подготовки управляющих программ формообразования листовых деталей на контактных дробеметных установках с ЧПУ: Автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. / А.Ю. Дияк // Иркутск, 2005. 19 с.
18. Дрозд, М.С. Аналитическое исследование напряжённого состояния при внедрении упругой сферы в упруго–пластическое полупространство / М.С. Дрозд, А.П. Осипенко // Металловедение и прочность металлов – Волгоград, 1977. – С. 58–68.
19. Дрозд, М.С. Выбор режимов дробеструйной обработки, обеспечивающих заданные параметры наклепанного слоя / М.С. Дрозд // Вестник машиностроения. №3. 1977. С. 42-45.

20. Журавлев, Д.А. Исследование процесса дробеударного формообразования длинномерных панелей летательных аппаратов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 1998. – №3. – С. 23–26.
21. Замащиков, Ю.И. Метод определения остаточных напряжений. Патент РФ №2121666. G 01 L 1/06. Приоритет от 18.04.96
22. Замащиков, Ю.И. Об исследовании на образцах начальных и остаточных напряжений в поверхностном слое / Ю.И. Замащиков // Механика деформируемых сред в технологических процессах: Сб. научн. тр. – Иркутск: ИрГТУ, 1997. С. 44-48.
23. Звягинцев, Н. В. Методы интеллектуального анализа данных в управлении химико-технологическими процессами / Н. В. Звягинцев, В.А. Биллиг // Информатика: проблемы, методы, технологии: материалы XXIII Международной научно-практической конференции им. Э.К. Алгаинова, Воронеж, 15–17 февраля 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2023. – С. 218-224.
24. Иванов, С.И. Определение остаточных касательных напряжений в цилиндрической детали методом колец / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ. - 1971. - Вып.53.- С. 107-115
25. Илюшкин, М.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе ANSYS/LS-DYNA (осадка цилиндрической заготовки): Учебно-методическое пособие. Ульяновск: УлГУ, 2012. 91с.
26. Исаев, А.И. Выбор оптимальной толщины образца при определении остаточных напряжений в поверхностном слое / А.И. Исаев, А.Н. Овсеенко // Вестник машиностроения. – 1967. – № 8. – С. 74-76.
27. Кольцов, В. П. К определению величины припуска при зачистке поверхности панелей и обшивок лепестковым кругом после дробеударного формообразования / В. П. Кольцов, Д. А. Стародубцева, А. П. Чапышев // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2017. – Т. 73, № 1. – С. 25-30.

28. Кононенко, В.Г. Исследование возможностей формоизменения монолитных панелей путем последовательного деформирования ребер / В.Г. Кононенко В.Т. Сикульский // Проблемы машиностроения: Респ. межвед. сборник. – 1981. – №4. – С. 32–36.
29. Кравчук, А.С. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS/LS-DYNA и основам LS-PREPOST. Ч. 3. Основные элементы графического интерфейса LS-PREPOST. Решение задач с помощью LS-DYNA Solver / А.С. Кравчук, А.И. Кравчук // Москва: БГУ, 2013. 74 с.
30. Лебедеко, В. Г. Математическое моделирование процесса формирования геометрических параметров поверхностного слоя и параметров упрочнения при обработке деталей дробью / В.Г. Лебедеко // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don), 8 (4-39), 202-212. (2008).
31. Лихачев, А.А. Реализация системы управления процессом дробеударного формообразования на установках контактного типа / А.А. Лихачев, В.В. Герасимов, А.А. Пашков // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (97). – С. 42–47.
32. Лукьянов, А.А. Корректная модель несжимаемой анизотропной пластичности: течение Хилла / А.А. Лукьянов, В.Б. Пеньков // Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия. – 2007. – №4 (54). – С. 280–289.
33. Лысов, М.И. Анализ влияния разброса механических свойств и толщины изгибаемых листовых заготовок на их остаточную форму при трехвалковой гибке-прокатке / М.И. Лысов, Н.В. Сосов, А.Г. Мартьянов // Межвуз. сборн. Пластическое формообразование деталей авиационной техники. Казань: КАИ. 1987. С.4–7.
34. Макарук, А.А. Методика расчета технологических параметров превентивного деформирования упрочняемых деталей типа "стенка" / А. А. Макарук, О. В. Самойленко, Ю. Н. Иванов [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2021. – Т. 25, № 1(156). – С. 8-16. – DOI 10.21285/1814-3520-2021-1-8-16

35. Макарук, А.А. Определение внутренних силовых факторов, возникающих при упрочнении подкрепленных ребрами деталей / А.А. Макарук, А.А. Пашков, А.М. Хамаганов, О.В. Самойленко // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. №10(141). С. 29-37. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-29-37.
36. Макарук, А.А. Повышение эффективности формообразования и правки мало жестких подкрепленных ребрами деталей раскаткой роликами / А.А. Макарук, Н. В. Минаев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 12(107). – С. 63-70.
37. Малащенко, А.Ю. Оптимизация технологических параметров упруго-пластической гибки длинномерных обшивок и панелей переменной кривизны / А.Ю. Малащенко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – № 6–2. – С. 409–412
38. Малащенко, А.Ю. Оптимизация технологических параметров упругопластической гибки длинномерных обшивок и панелей переменной кривизны / А.Ю. Малащенко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 15. 2013. №6(2). С. 409-412.
39. Минаев, Н.В. К созданию предсказательной модели процесса формообразования и правки подкрепленных панелей раскаткой роликами / Н.В. Минаев // Современные авиационные технологии. 2023. С. 15-25
40. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. — Москва: Машиностроение, 2003.
41. Носачев, Е.А. Выбор методов в машинном обучении для кластеризации научных статей / Е. А. Носачев // Вестник науки, vol. 1, no. 6 (75), 2024, pp. 1508-1515.
42. Овсенко, А.Н. Технологические остаточные напряжения и методы их определения / А.Н. Овсенко // Прогрессивные технологические процессы механосборочного производства в турбостроении: Сб. научн. тр. ЦНИИТМАШ. – М., 1986. –Вып. № 196. – С. 9-15.

43. Олейников, А.И. Моделирование формообразования крыльевых панелей в режиме ползучести с деформационным старением в решениях обратных задач / А.И. Олейников, К.С. Бормотин // Ученые записки Комсомольского–на–Амуре государственного технического университета. – 2015. – №11–1 (22). – С. 5–12.
44. Олейников, А.И. Интегрированное проектирование процессов изготовления монолитных панелей. / А.И. Олейников, А.И. Пекарш //– М.: «Эком», 2009. – 112 с.
45. Официальный сайт Livermore Software Technology Corporation. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.lstc.com/products/lstc-dyna>, свободный (дата обращения 01.09.2024).
46. Панова, А.Ю. Технология и мероприятия по повышению качества панелей крыла самолёта на участке их формообразования / А.Ю. Панова, В.И. Максименков // Авиакосмические технологии (АКТ–2015) Тезисы I тура XVI Всероссийской научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. – 2015. – С. 62–63.
47. Патент №125505 Дробебетное устройство патент на полезную модель. Год 2012. Дата регистрации: 10.06.2013. Номер заявки: 2012136404
48. Патент US №4329862. МПК B24J 5/00; C21D 7/0. Shot Peen Forming of Compound Contours. Опубликовано 18.05.1982.
49. Патент на изобретение РФ №2475322, МПК B21D 11/20. Способ формообразования деталей. Опубликовано 20.02.2013.
50. Патент РФ № 133761 Валковая листогибочная машина Год: 2013 Дата регистрации: 17.12.2012. Номер заявки: 2012154723/02
51. Патент РФ №2121666. МПК: 6G 01L 1/06 А. Способ определения остаточных напряжений. Опубликовано 20.05.2010.
52. Пашков, А. Е. Исследование начальных напряжений процесса обработки дробью / А.Е. Пашков, А.А. Пашков, О.В. Самойленко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.

- Носова. – 2022. – Т. 20, № 4. – С. 120-128. – DOI 10.18503/1995-2732-2022-20-4-120-128.
53. Пашков, А. Е. Конечно-элементное моделирование процесса дробеударного формообразования с использованием внутренних силовых факторов процесса обработки / А.Е. Пашков, А.А. Пашков, С.А. Антипин, С.Ю. Фалеев, О.В. Самойленко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 12. – С. 282-287. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-12-282-283.
54. Пашков, А.А. Определение фракционного состава дробы при упрочнении ударными методами с помощью технического зрения / А.А. Пашков, О.В. Самойленко, // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 10-17. – DOI 10.22213/2413-1172-2022-4-10-17.
55. Пашков, А.А. Совершенствование процесса формообразования листовых деталей двойной кривизны на дробеметных установках контактного типа: Автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. / А.А. Пашков // Иркутск, 2018. 22 с.
56. Пашков, А.Е. Конечно-элементное моделирование процесса дробеударного формообразования с использованием внутренних силовых факторов процесса обработки / А.Е. Пашков А.А. Пашков, С.А. Антипин, О.В. Самойленко // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. №12.
57. Пашков, А.Е. Конечно-элементное моделирование процесса обработки хаотичным потоком дробы / А.Е. Пашков, А.А. Пашков, Ю.С. Андрияшина // В кн.: Авиамашиностроение и транспорт Сибири: Сб. статей XI Всероссийской. науч.-техн. конф. «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» – Иркутск: изд-во ИРНТУ, 2018. С. 91-96
58. Пашков, А.Е. О повышении эффективности дробеметной установки контактного типа / А.Е. Пашков, В.В. Герасимов, А.А. Пашков // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 10 (81). – С. 46–52.

59. Пашков, А.Е. Об особенностях применения отечественной и зарубежной технологии формообразования обшивок и панелей самолетов / А.Е. Пашков // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 5(100). – С. 17-22.
60. Пашков, А.Е. Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей / А.Е. Пашков // Иркутск: ИрГТУ, 2005. – 140 с.
61. Рошаль, Л.М. Сопротивление материалов / Л.М. Рошаль, В.А. Коровин // Издательство "Высшая школа", 2005.
62. Румянцев, Ю.С. Об устранении поволок крупногабаритных поверхностно упрочненных деталей из алюминиевых сплавов / Ю.С. Румянцев, Н.В. Анисимова, А.Г. Рудаков // Авиационная промышленность. –1992. –№ 12. – С. 5-6.
63. Рыковский, Б.П. Местное упрочнение деталей поверхностным наклёпом / Б.П. Рыковский, В.А. Смирнов, Г.М. Щетинин // – М.:Машиностроение, 1985. – 152с.
64. Саверин, М.М. Дробеструйный наклёп / М.М. Саверин // – М.: Машгиз, 1955. – 312с.
65. Свидетельство №2013612465 Автоматизированная система определения остаточных напряжений в образцах на установке для измерения остаточных напряжений.
66. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014611955 от 13.02.2014
67. Сделано у нас [Электронный ресурс] <https://sdelanounas.ru/blogs/9748/>, свободный (Дата обращения 08.10.2024).
68. Смирнов, В.А. Аналитическое исследование остаточных напряжений и деформаций в процессе обработки деталей дробью / В.А. Смирнов // Известия вузов «Машиностроение». – 1977.–№1– С.150-155.
69. Сосов, Н.Н. Система моделирования свободной гибки и правки длинномерных панелей переменной толщины на перспективном гидропрессе СПП 250М с

- ЧПУ / Н.Н. Сосов // Тез. докл. III Всероссийской конференции центров коллективного пользования Министерства образования и науки РФ.-КГУ, Казань,2006,С.83.
70. Сосов, Н.Н. Методика расчета параметров свободной гибки и правки длинномерных панелей переменной толщины на гидропрессе СПП-250 с ЧПУ / Н.Н. Сосов, В.Н, Мацнев //Авиационная промышленность.-2007.-№2, С. 22-27.
71. Стрелец, Д. Ю. Применение суперкомпьютерных технологий для решения актуальных задач проектирования новых образцов авиационной техники / Д. Ю. Стрелец // Рациональное управление предприятием № 2, 2014 г. - стр.48-5.
72. Суоминнен, Л. Обнаружение дефектов шлифования деталей из ферромагнитных материалов с использованием эффекта Баркгаузена / Л. Суоминнен // В мире неразрушающего контроля 2 (52) июнь 2011. – С.74-78
73. Толоконцев, Н.А. О вычислении среднего квадратического отклонения по размаху / Н.А. Толоконцев // Гигиена и санитария, по. 10, 1970, pp. 83-87.
74. Фалеев, С. Ю. Автоматизация процесса анализа формы крупногабаритных деталей сложной формы по трехмерным моделям / С.Ю. Фалеев, А.А. Пашков, М.Ю. Рыжков // VIII международная конференция проблемы механики современных машин: Сборник статей конференции, оз. Байкал, 04–09 июля 2022 года. – Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2022. – С. 554-562. – DOI 10.53980/9785907599055_554.
75. Федоренко, В. Ю. Применение технологии машинного зрения в различных сферах жизни современного общества / В.Ю. Федоренко // Теория и практика современной науки. 2021. № 8 (74). С. 36–39.

76. Чепа, П.А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / П.А. Чепа // Минск: Наука и техника, 1981. –128 с.
77. Шелков, В.С. Формообразование монолитных панелей двойной кривизны с рёбрами жесткости, расположенными с выпуклой стороны обшивки / В.С. Шелков, В.Н. Баушев // Авиационная промышленность. №9, 1985 – С. 19-22
78. Al-Obaidg, Y.F. Three-dimensional dynamic finite element analysis for shot-peening mechanics / Y.F. Al-Obaid // Computers & Structures, 36(4), 681–689. doi:10.1016/0045-7949(90)90083-e (1990).
79. Prakash, A.N. Microstructural evolution and mechanical properties of oil jet peened aluminium alloy / A.N. Prakash, R.M. Gnanamoorthy, M. Kamaraj // Material and Design. – October 2010. – Vol. 31. – Issue 9. – P. 4066 – 4075.00
80. Badrinarayan, P. A computational approach for fatigue life prediction in shot peened welded specimens / P. A. Badrinarayan, P. S. Narendra, P. Lingyun, H. Wei и др. // Welding in the World. – November 2012. – Vol. 57. – Issue 5, P. 675–684.
81. Baughman, D. An Overview of Peen Forming Technology. / D. Baughman // Pergamon Press Adv. Surf. Treat. Technol. Appl. Effects 3, 209 (1986)
82. Baragetti, S. Three-dimensional finite-element procedures for shot peening residual stress field prediction / S. Baragetti // International Journal of Computer Applications in Technology. – Vol. 14. – Issue 1–3. P. 51–63. 2001.
83. Barrett, C. Investigation of the effects of elastic prestressing technique on magnitude of compressive residual stress induced by shot peening of thick Aluminum plates / C. Barrett, R. Todd // Proceedings of the 2nd international conference on shot peening. – 1984. P. 15–21.
84. Chen, J.S. Literature review of numerical simulation and optimisation of the shot peening process / J.S. Chen, D.A. Desai, S.P. Heys, F. Pietra // Advances in Mechanical Engineering. 2019;11(3). doi:10.1177/1687814018818277 1.

85. David, A. Anderson Automatic or Manual Four-axes Sanding Machine System for Sanding and/or Finishing a Vertically Held Contoured Part. U.S. Patent 4,461,124 (1984).
86. Dobes, M. Damping – Oscillation Elimination after Rupture / M. Dobes, J.Navratil // DYNAmore 2013
87. Ebenau, A., Macherauch E. Influence of the shot peening angle on the condition of nearsurface layers in materials / A. Ebenau, E. Macherauch // Proc. 3rd conf. shot peening (ICSP3). – 1987. – P. 253–260.
88. Erfan, M. A systematic study on the effects of shot peening on a mild carbon steel / M. Erfan, U. Okan, K. R. Kashyzadeh, S. Bagherifard, M. Guagliano // Applied Surface Science Advances. — 2021. — Vol. 4. — Art. 100071. — DOI: 10.1016/j.apsadv.2021.100071.Science Advances. 4. 100071. 10.1016/j.apsadv.2021.100071. (2021).
89. Esposito, M Experimental Shape Sensing and Load Identification on a Stiffened Panel /M. Esposito, M. Mattone, M. Gherlone // A Comparative Study. Sensors (Basel). 2022 Jan 29;22(3):1064. doi: 10.3390/s22031064. PMID: 35161812; PMCID: PMC8837932.
90. Baumann, G. Modelling of a traditional bow and arrow / G. Baumann, G. Schickhofer, S. Zimmer, F. Feist // Material modelling and dynamic simulation. — 2018.
91. Gariepy A. Shot peening and peen forming finite element modelling – Towards a quantitative method / A. Gariepy, L. Simon, P. Claude, M. Levesque // International Journal of Solids and Structures - INT J SOLIDS STRUCT. (2011) 48. 10.1016/j.ijsolstr.2011.06.003.
92. Gariepy A. Potential applications of peen forming finite element modelling / A. Gariepy, J. Cyr, L. Andy, P. Claude, B. Philippe, M. LeVesque // Advances in Engineering Software. 52. 60-71. 10.1016/j.advengsoft.2012.06.006. (2012).
93. Grasty, L.V. Shot Peen Forming Sheet Metal: Finite Element Prediction of Deformed Shape / L.V. Grasty, C. Andrew // Proceedings of the Institution of

- Mechanical Engineers, Part B. 1996; 210(4): 361-366.
doi:10.1243/PIME_PROC_1996_210_129_02
94. Hallquist, J.O. LS-DYNA Keyword User's Manual, version 970 / J.O. Hallquist – Livermore Software Technology Corporation. – April 2003. –Vol. 1. – 2682 p.
 95. Harburn, B. Shot Peen Forming of Compound Contours : U.S. Patent 4 329 862 / B. Harburn, J. C. Miller. — Date of Patent: Apr. 19, 1982.
 96. Huang, H. Effects of the Shot Peening Process on Corrosion Resistance of Aluminum Alloy : a review / H. Huang, J. Niu, X. Xing, Q. Lin, H. Chen, Y. Qiao // Coatings. — 2022. — Vol. 12. — Art. 629. — DOI: 10.3390/coatings12050629.
 97. Jichao Li, Machine Learning in Aerodynamic Shape Optimization / J. Li, X. Du, J. M. // arXiv. — 2022. — arXiv:2202.07141. — DOI: 10.48550/arXiv.2202.07141.
 98. Junlai, Li. Comprehensive Improvement Technology Research on Marine Shot Blasting Machine / J. Li, Y. Xie // Proceedings of the International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (IC3ME-15). — 2015. — P. 409. — DOI: 10.2991/ic3me-15.2015.409.
 99. Kang, X. Multiple impact modelling for shot peening and peen forming / X. Kang, T. Wang, J. Platts, // Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Manuf., 224 (5) (2010), pp. 689-697
 100. Karuppanan, S. A theoretical and experimental investigation into the development of coverage in shot peening / S. Karuppanan, J.S. Romero, de los Rios ER, C. Rodopoulos, A. Levers // Proceedings of the 8th international conference on shot peening; 2002. p.101–7.
 101. Kennerknecht et al. Shaped Metal Panels and Forming Same by Shot Peening. U.S. Patent 4 6,938,448 (2005).
 102. Kirk, D. Metrology of Almen Arc Height Measurement / D. Kirk // Shot peener. – Spring 2008. – P. 24-34
 103. Koch, W. J. Peen forming predictions using finite element analysis / W. J. Koch // Seattle, WA: Applied Research and Technology, 1997

104. Kopp, R. Modern simulation and optimization of peen forming processes / R. Kopp, F. Wustefeld // Conf Proc: ICSP-4. – 1990. – P.561–572
105. Kopp, R. Optimising the double-sided simultaneous shot peen forming / R. Kopp, J. Schulz // Conf Proc: ICSP-8. – 2002. – P. 227–233.
106. Kopp, R. Recent developments in shot peen forming. / R. Kopp, H.W. Ball // Proc. of the 3rd international conference on shot peening. – 1987. P. 297–308.
107. Levers, A. Finite element simulation of shot peening / A. Levers, A. Prior // The Shot peener – Vol. 9. Issue 3, pages 14–16.
108. Lillamand, I. Cyclic modelling of the mechanical state produced by shot-peening / I. Lillamand, L. Barrallier, B. Lalanne, L. Castex // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 2001. № 24. – P. 93–104.
109. Lior Rokach, Oded Maimon. (2005). Decision Trees. 10.1007/0-387-25465-X_9.
110. Lysov, M.I. Theory and calculation of processes for manufacturing parts by bending methods / M.I. Lysov // Moscow: Mashinostroenie, 1966. - 236 p.
111. Mater, J. Finite element analysis of shot peening / J. Mater // Process. Technol., 80–81 (1998), pp. 304-308
112. Miao, H. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening / H. Miao, L. Simon, C. Perron, M. Levesque // Advances in Engineering Software. 40. 1023-1038. 10.1016/j.advengsoft.2009.03.013. (2009).
113. Mingtao, W Research on torsion deformation of integral stiffened panel by pre-stress shot peen forming / W. Mingtao, Z. Yuansong, B. Xuepiao, L. Fenggong // Procedia Manufacturing. 50. 74-78. 10.1016/j.promfg.2020.08.014. (2020).
114. MPF 20000 Aircraft Wing Peening [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.wheelabratorgroup.com/ru-ru/>, свободный (дата обращения 10.10.2024).
115. Nicu-Lari, A. Methode de la fleche, methode de la source des cintraintes residueles / A. Nicu-Lari // 1-st Int. Conf. on Shot Peening. – Paris, 14 – 17 Sept. 1981 (ICSP1). –Oxford e. a., 1982.–P. 234-247

116. Pashkov, A. E.. The upgrade of peen forming equipment for long-sized aircraft parts / A.E. Pashkov, A.Y. Malashchenko, A.A. Pashkov, A.A. Duk // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Irkutsk, 21–26 сентября 2020 года. Vol. 1061. – Irkutsk: IOP Publishing Ltd, 2021.
117. Pashkov, A.E. Complex method of peen forming and shot peening of aircraft structural components/ A.E. Pashkov, V.P. Koltsov, A.A. Pashkov // 2017 Advances in Engineering Research 2017. Volume 133. P. 585-5913.
118. Pashkov, A.E. Development of digital manufacturing technologies for frame and casing parts. / A.E. Pashkov, A.Y Malashcheko, A.A. Pashkov, K.V. Bogdanov, A.V. Kryuchkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 632. 012104. 10.1088/1757-899X/632/1/012104. (2019).
119. Pashkov, A.E. Parameters identification for combined forming of complex shaped sheet metal components / A.E. Pashkov, A.A. Pashkov, A.Y. Malashchenko, T.V. Zarak // Advances in Engineering Research. 2018, volume 158. P. 67-72]
120. Pierre, F. Simulating shot peen forming with eigenstrains. Journal of Materials Processing Technology / F. Pierre, G. Frederick, L. Martin // 254. 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.036. (2017).
121. Prevéy, P. Problems with non-destructive surface X-ray diffraction residual stress measurement. Practical application of residual stress technology, ed. C. Ruud, Material Park, OH: American Society for Metals, 1991, pp. 47-54.
122. Rahul, R Conjugate exponential family graphical models in process monitoring: a tutorial review / R. Rahul, B. Huang // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. — 2020. — Vol. 204. — Art. 104095. — DOI: 10.1016/j.chemolab.2020.104095.
123. Ramati, S. Single piece wing skin utilization via advanced peen forming technology / S. Ramati, G. Levasseur, S. Kennerknecht // 7–th Int. Conf. on Shot Peening. – Warsaw, Poland, 28–30 Sept. 2000. P. 1–18. C 1528–1535
124. Shen Liu Computer vision in big data applications / James McGree, Zongyuan Ge, Yang Xie. // 10.1016/B978-0-12-803732-4.00004-0. (2016).

125. Sikulskiy, V. Modeling the forming process by successive local deforming for monolithic stiffened panels / V. Sikulskiy, S. Sikulskiy, K. Maiorova, Yu. Dyachenko // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 124, No. 5-6. – P. 1569-1578. – DOI 10.1007/s00170-022-10582-9.
126. Siqiong, Yao. Enhancing the fairness of AI prediction models by Quasi-Pareto improvement among heterogeneous thyroid nodule population / Yao Siqiong, Dai Fang, Sun Peng, Zhang Weituo, Qian Biyun, Lu Hui. // *Nature Communications*. 15. 10.1038/s41467-024-44906-y. (2024).
127. Sonaca Group [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.sonaca.com/>, свободный (дата обращения 08.10.2024)
128. Swietlicki, A. Effects of Shot Peening and Cavitation Peening on Properties of Surface Layer of Metallic Materials - A Short Review. / Swietlicki A., Szala M., Walczak M. // *Materials*. 15. 10.3390/ma15072476. (2022).
129. Takanori, M Effects of peening conditions and sheet geometry on spherical to cylindrical deformation shifts / M Takanori, Ohta Takahiro. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 132. 1-15. 10.1007/s00170-024-13387-0. (2024).
130. Tong Wang A combined computer vision and image processing method for surface coverage measurement of shot peen forming / Tong Wang, Jingbo Zhang, Shuwei Zhang, Xianjie Zhang, Junbiao Wang. // *Journal of Manufacturing Processes*. 91. 137-148. 10.1016/j.jmapro.2023.02.035. (2023).
131. Vaccari, J.A. Peen forming enters computer age / J.A. Vaccari // *American Machinist*, 1985. - June. - P. 91-94
132. Wang, T. A process model for shot peen forming / T. Wang, M. J. Platts, A. Levers // *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 172, 2006, pp. 159–162
133. Wang, T. Finite element impact modelling for shot peen forming / T. Wang, J. Platts, A. Levers // in: *Proc. 8th Conf. Shot Peening (ICSP8)*, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2002, pp. 540–546.

134. Wassime, S Efficient planning of peen-forming patterns via artificial neural networks / S. Wassime, K. Farbod, G. Frederick.// *Manufacturing Letters*. 25. 10.1016/j.mfglet.2020.08.001. (2020).
135. Wolfhart, H. The influence of peening conditions on the resulting distribution of residual stress / H. Wolfhart // *Proc. 2nd conf. shot peening (ICSP2)*. – 1984. – P. 316 – 331.
136. Xudong Xiao Prediction of shot peen forming effects with single and repeated impacts / Xudong Xiao, Xin Tong, Yanwei Liu, Renfeng Zhao, Guoqiang Gao, Yan Li // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018: Vol. 137. pages 182-194, ISSN 0020-7403.
137. Yizhe Liu Deep learning in frequency domain for inverse identification of nonhomogeneous material properties / Liu Yizhe, Chen Yuli, Ding Bin // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 168. 105043. 10.1016/j.jmps.2022.105043. (2022).
138. Zhuo Chen. Realistic Finite Element Simulations of Arc–Height Development in Shot–Peened Almen Strips / Zhuo Chen, Fan Yang, S. A. Meguid // *Journal of Engineering Materials and Technology*. – October, 2014. – Vol. 136

Список сокращений и условных обозначений

БД	База данных
ВСДФ	Внутренних силовых деформаций
ДА	Дробемётный аппарата
ДУУ	Дробеударное упрочнение
КИС	Контрольно-измерительная система
КО	Операции – контрольные
КПО	Конструктивно подобный образец
КЭ	Конечный элемент
КЭМ	Конечно-элементная модель
МО	Машинное обучение
НДС	Напряжённно-деформируемое состояние
НН	Начальные напряжения
ОН	Остаточные напряжения
ПО	Программное обеспечение
РО	Операции – расчётные
РУ	Расчётный участок
СК	Система координат
СО	Среднеквадратичное отклонение
ТК	Теоретический контур
ТО	Операция – технологическая
ТП	Технологический процесс
УКТ	Установка контактного типа
УП	Управляющая программа
УПТ	Установка проходного типа
ЭН	Эквивалентная нагрузка
CAD	Computer-aided design
<i>d</i>	Диаметр отпечатка
<i>E</i>	Модуль упругости

ε	Деформации;
$\varepsilon_{н_м}$	Величина максимальных пластических деформаций (интенсивность деформаций по Мизесу)
$\varepsilon_{н_п}$	Величина поверхностных пластических деформаций (интенсивность деформаций по Мизесу)
GMM	Гауссово распределение
$h_{нл}$	Глубина залегания начальных напряжений деформаций
σ	Напряжения
$\sigma_{н_м}$	Величина максимальных НН (напряжения подслоного максимума)
$\sigma_{н_п}$	Величина поверхностных начальных напряжений

Приложение А

Таблица А.1 – База данных единичного внедрения шарика в поверхность детали

<i>D</i> , мм <i>v</i> , мм/с	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25
1000	d = 0,192 мм, h=0,03 мм,	d = 0,208 мм, h=0,04 мм,	d = 0,234 мм, h=0,0437 мм,	d = 0,239 мм, h=0,045 мм,	d = 0,256 мм, h=0,047 мм,	d = 0,271 мм, h=0,048 мм,
3000	d = 0,322 мм, h=0,111 мм,	d = 0,347 мм, h=0,114 мм,	d = 0,386 мм, h=0,13 мм,	d = 0,4 мм, h=0,135 мм,	d = 0,429 мм, h=0,137 мм,	d = 0,453 мм, h=0,141 мм,
6000	d = 0,454 мм, h=0,217 мм,	d = 0,491 мм, h=0,222 мм,	d = 0,54 мм, h=0,244 мм,	d = 0,576 мм, h=0,258 мм,	d = 0,606 мм, h=0,268 мм,	d = 0,647 мм, h=0,278 мм,
9000	d = 0,5685 мм, h=0,325 мм,	d = 0,578 мм, h=0,333 мм,	d = 0,667 мм, h=0,364 мм,	d = 0,674 мм, h=0,383 мм,	d = 0,767 мм, h=0,4 мм,	d = 0,793 мм, h=0,418 мм,
12000	d = 0,619 мм, h=0,43 мм,	d = 0,706 мм, h=0,46 мм,	d = 0,749 мм, h=0,482 мм,	d = 0,774 мм, h=0,513 мм,	d = 0,841 мм, h=0,533 мм,	d = 0,862 мм, h=0,557 мм,
15000	d = 0,703 мм, h=0,53 мм,	d = 0,81 мм, h=0,563 мм,	d = 0,8389 мм, h=0,59 мм,	d = 0,897 мм, h=0,61 мм,	d = 0,956 мм, h=0,68 мм,	d = 0,909 мм, h=0,698 мм,

Продолжение таблицы А.1

$D, \text{ мм}$ $v, \text{ мм/с}$	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
1000	$d = 0,277 \text{ мм}$, $h = 0,05 \text{ мм}$	$d = 0,302 \text{ мм}$, $h = 0,052 \text{ мм}$	$d = 0,309 \text{ мм}$, $h = 0,055 \text{ мм}$	$d = 0,307 \text{ мм}$, $h = 0,054 \text{ мм}$	$d = 0,341 \text{ мм}$, $h = 0,058 \text{ мм}$	$d = 0,349 \text{ мм}$, $h = 0,057 \text{ мм}$	$d = 0,384 \text{ мм}$, $h = 0,062 \text{ мм}$
3000	$d = 0,494 \text{ мм}$, $h = 0,149 \text{ мм}$	$d = 0,521 \text{ мм}$, $h = 0,154 \text{ мм}$	$d = 0,515 \text{ мм}$, $h = 0,159 \text{ мм}$	$d = 0,543 \text{ мм}$, $h = 0,164 \text{ мм}$	$d = 0,580 \text{ мм}$, $h = 0,169 \text{ мм}$	$d = 0,555 \text{ мм}$, $h = 0,174 \text{ мм}$	$d = 0,645 \text{ мм}$, $h = 0,178 \text{ мм}$
6000	$d = 0,672 \text{ мм}$, $h = 0,291 \text{ мм}$	$d = 0,718 \text{ мм}$, $h = 0,299 \text{ мм}$	$d = 0,738 \text{ мм}$, $h = 0,312 \text{ мм}$	$d = 0,786 \text{ мм}$, $h = 0,321 \text{ мм}$	$d = 0,805 \text{ мм}$, $h = 0,333 \text{ мм}$	$d = 0,84 \text{ мм}$, $h = 0,343 \text{ мм}$	$d = 0,883 \text{ мм}$, $h = 0,353 \text{ мм}$
9000	$d = 0,857 \text{ мм}$, $h = 0,436 \text{ мм}$	$d = 0,867 \text{ мм}$, $h = 0,451 \text{ мм}$	$d = 0,937 \text{ мм}$, $h = 0,472 \text{ мм}$	$d = 0,927 \text{ мм}$, $h = 0,491 \text{ мм}$	$d = 0,997 \text{ мм}$, $h = 0,51 \text{ мм}$	$d = 1,057 \text{ мм}$, $h = 0,538 \text{ мм}$	$d = 1,092 \text{ мм}$, $h = 0,552 \text{ мм}$
12000	$d = 0,958 \text{ мм}$, $h = 0,582 \text{ мм}$	$d = 0,976 \text{ мм}$, $h = 0,612 \text{ мм}$	$d = 1,054 \text{ мм}$, $h = 0,65 \text{ мм}$	$d = 1,101 \text{ мм}$, $h = 0,68 \text{ мм}$	$d = 1,155 \text{ мм}$, $h = 0,699 \text{ мм}$	$d = 1,184 \text{ мм}$, $h = 0,736 \text{ мм}$	$d = 1,237 \text{ мм}$, $h = 0,76 \text{ мм}$
15000	$d = 1,052 \text{ мм}$, $h = 0,728 \text{ мм}$	$d = 0,995 \text{ мм}$, $h = 0,754 \text{ мм}$	$d = 1,144 \text{ мм}$, $h = 0,798 \text{ мм}$	$d = 1,219 \text{ мм}$, $h = 0,827 \text{ мм}$	$d = 1,256 \text{ мм}$, $h = 0,863 \text{ мм}$	$d = 1,284 \text{ мм}$, $h = 0,897 \text{ мм}$	$d = 1,319 \text{ мм}$, $h = 0,91 \text{ мм}$

Приложение Б

Результаты множественного внедрения дроби в пластину для определения напряжений и деформаций
поверхностного слоя



Рисунок В.1 – Эпюры начальных напряжений в образцах, обработанных пневмодинамическим методом

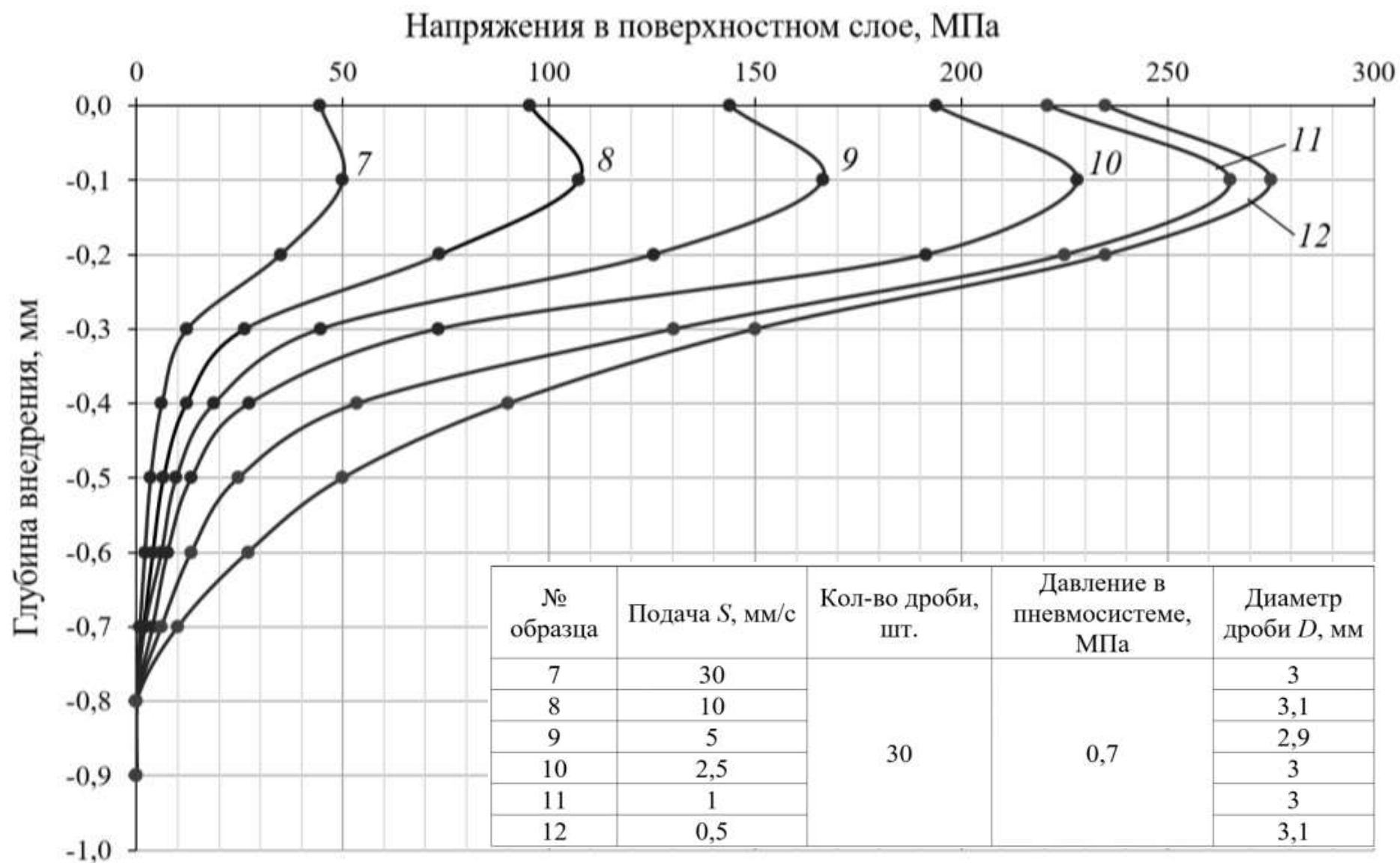


Рисунок В.2 – Эпюры начальных напряжений в образцах, обработанных пневмодинамическим методом



Рисунок В.3 – Эпюры деформаций в образцах, обработанных пневмодинамическим методом

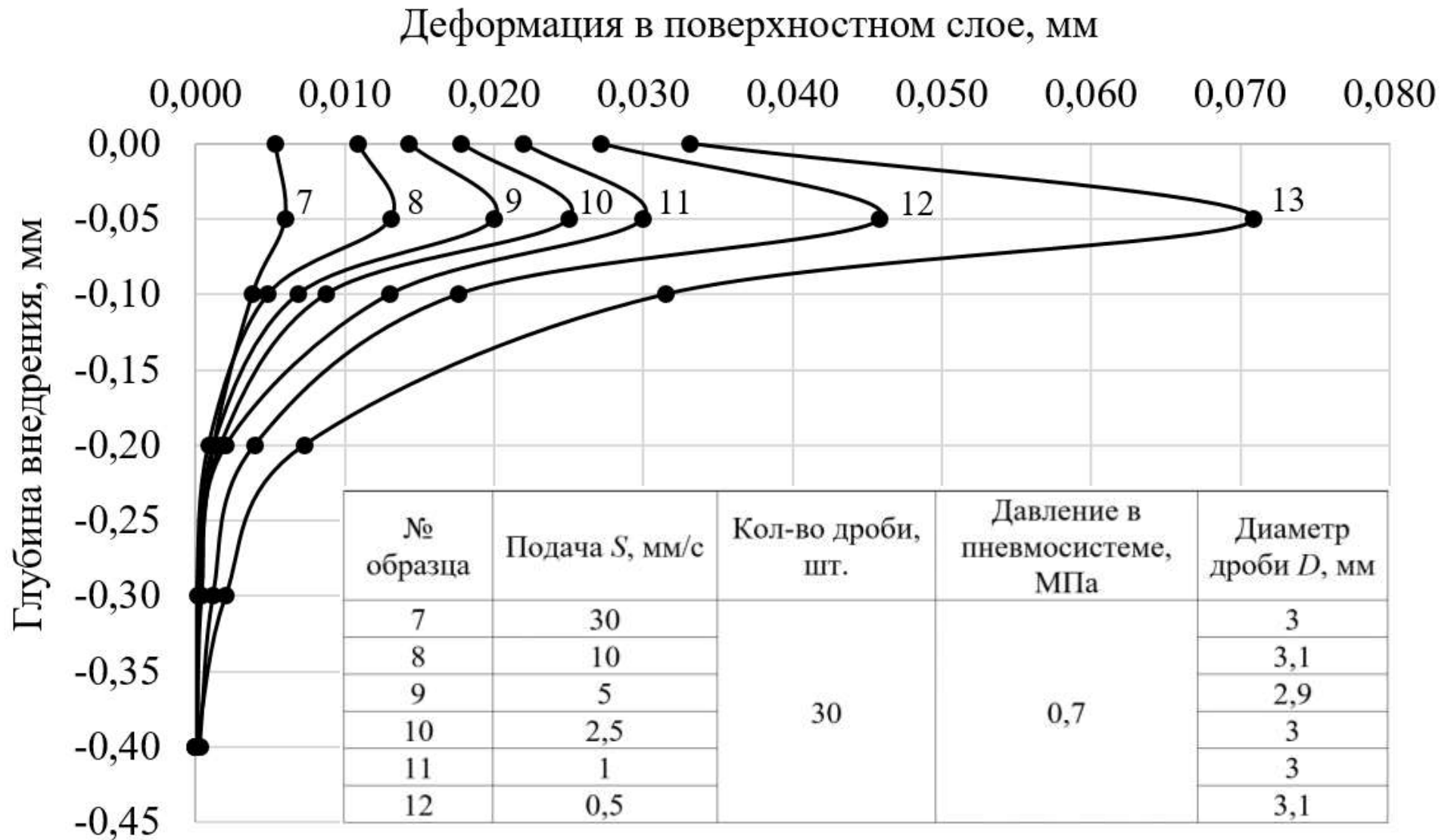


Рисунок В.4 – Эпюры деформаций в образцах, обработанных пневмодинамическим методом

Приложение В

Таблица В.1 – Фрагмент базы данных зависимости эквивалентной нагрузки, возникающей при ДУФ, и геометрических параметров РУ деталей

№ образца	b, мм	S	b1, мм	b2, мм	R1, мм	L, мм	Зависимость поперечной стрелы прогиба от НН	Зависимость поперечной стрелы прогиба от НН
1	271,9	2,5	69,7	161,3	3	200	$f_x = \frac{a^2}{8 \cdot (233,05 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 8497,4 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 92012)}$	$f_y = \frac{a^2}{8 \cdot (3968 \cdot \sigma^2 - 145484 \cdot \sigma + 2E+06)}$
2	145,4	2,5	68,7	68,1	3		$f_x = \frac{a^2}{8 \cdot (113,4 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 4174,4 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 45320)}$	$f_y = \frac{a^2}{8 \cdot (2984,6 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 10952 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 1E+06)}$
3	199,8	3,5	67,7	67,6	3		$f_x = \frac{a^2}{8 \cdot (98,64 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 3613 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 39010)}$	$f_y = \frac{a^2}{8 \cdot (4055,8 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 142735 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 1E+06)}$
4	218,5	4	61,8	72,9	3		$f_x = \frac{a^2}{8 \cdot (85,31 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 3130,7 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 33906)}$	$f_y = \frac{a^2}{8 \cdot (8153,3 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 297284 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 3E+06)}$
5	146,6	6	79,2	51,2	5	200	$f_x = \frac{a^2}{8 \cdot (941,67 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 34578 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 374260)}$	$f_y = \frac{a^2}{8 \cdot (-440,97 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 + 21012 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 161765)}$
6	145,8	6	67,7	62	5		$f_x = \frac{a^2}{8 \cdot (749,35 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 27462 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 297543)}$	$f_y = \frac{a^2}{8 \cdot (-1357,3 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 + 30016 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 + 332212)}$
7	144,7	9,1	66,8	59	5		$f_x = \frac{a^2}{8 \cdot (718,11 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 25925 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 274790)}$	$f_y = \frac{a^2}{8 \cdot (-2116 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 + 72553 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 238323)}$
8	148	7,9	58,5	50,1	3,8		$f_x = \frac{a^2}{8 \cdot (621,25 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 22491 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 239542)}$	$f_y = \frac{a^2}{8 \cdot (18723 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 692596 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 8E+06)}$
9	151,4	6,5	63,5	69,9	5		$f_x = \frac{a^2}{8 \cdot (568,86 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 20754 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 222872)}$	$f_y = \frac{a^2}{8 \cdot (1699,3 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 62239 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 672172)}$
10	151,4	31	63,5	69,9	5	200	$f_x = \frac{a^2}{8 \cdot (569,81 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 20882 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 225557)}$	$f_y = \frac{a^2}{8 \cdot (10258 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 370663 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 4E+06)}$
11	143,1	33,7	58,8	60,9	5		$f_x = \frac{a^2}{8 \cdot (461,19 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 16880 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 181888)}$	$f_y = \frac{a^2}{8 \cdot (23857 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 874233 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 9E+06)}$
12	217,2	11,2	62,7	128,6	5		$f_x = \frac{a^2}{8 \cdot (291,36 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 10653 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 115221)}$	$f_y = \frac{a^2}{8 \cdot (19311 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 706744 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 8E+06)}$
13	144,2	29,5	64,6	57,6	3		$f_x = \frac{a^2}{8 \cdot (245,07 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 8856,1 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 94143)}$	$f_y = \frac{a^2}{8 \cdot (12202 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 446083 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 5E+06)}$
14	270,8	3,5	71,4	191	3	300	$f_x = \frac{a^2}{8 \cdot (5E-08 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 0,0024 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 + 34,588)}$	$f_y = \frac{a^2}{8 \cdot (6298,8 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 223692 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 2E+06)}$
15	149,9	3,5	71,6	70,7	0		$f_x = \frac{a^2}{8 \cdot (7E-08 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 0,0029 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 34,39)}$	$f_y = \frac{a^2}{8 \cdot (4174,1 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 152965 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 2E+06)}$
16	272,4	3,5	138,4	70	2,7		$f_x = \frac{a^2}{8 \cdot (5E-08 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 0,0024 \cdot \sigma_{\text{НП}} + 34,498)}$	$f_y = \frac{a^2}{8 \cdot (5041,7 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 - 184516 \cdot \sigma_{\text{НП}}^2 + 2E+06)}$

Приложение Г

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель управляющего директора
по проектированию, научно-техническому и
инновационному развитию АО «Туполев»

Деянов Е.А.

2026 г.

АКТ

использования результатов научно-исследовательских,
опытно-конструкторских и технологических работ

В рамках исполнения договора от 23.08.2022 г. № 56/22 на выполнение научно-исследовательских и опытно-технологических работ на тему: «Разработка комплексной технологии формообразования-упрочнения длинномерных панелей и обшивок», заключенного в рамках выполнения работ по изготовлению и поставке на Филиал АО «Туполев» – Казанский авиационный завод им. С.П. Горбунова автоматизированной линии формообразования, зачистки и упрочнения длинномерных панелей и обшивок (1 комплекс оборудования) были выполнены следующие работы по разработке методик и программного обеспечения (ПО) для определения параметров обработки деталей типа панелей самолёта и составления управляющих программ оборудования, используемого при реализации операций комбинированных технологических процессов (ТП) формообразования-упрочнения деталей:

1. Разработка методик и ПО для определения исходных данных для расчета параметров обработки деталей.

1.1 Разработаны методика и ПО для определения по 3D модели детали геометрических параметров в виде компонент кривизны и жесткости сечений в контрольных точках сечений детали.

2. Разработка методик и ПО для определения режимов обработки деталей.

2.1 Разработаны методика и ПО для определения режимов обработки в ТП формообразования-упрочнения с промежуточным контролем формы деталей типа

- обшивок;
- панелей с продольным оребрением;
- панелей с поперечным оребрением.

Настоящий акт предназначен для предъявления в Высшую аттестационную комиссию при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации и не может служить основанием для финансовых претензий к АО «Туполев».

От ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»

Научный руководитель НИР


 А.Е. Пашков

Инженер-исследователь

 С.Ю. Фалеев

От АО «Туполев»

Главный технолог

 В.Ю. Неструев

Приложение Д

Листинг точки входа для программы автоматизированного получения геометрических параметров длинномерной детали

```

using NxOpen_after_NG209.GUI;
using NXOpen.UF;
using NXOpen;
using NXOpen.BlockStyler;
using NXOpen.Utilities;
using System.Reflection;
using NXOpen.Features;
using System.Collections.Generic;
using Excel = Microsoft.Office.Interop.Excel;
using Microsoft.Office.Interop.Excel;
using System.Windows.Forms;
using System.Linq;
using System.Runtime.CompilerServices;
public class IniItems
{
    protected static Session session = null;
    protected static UFSession uFSession = null;
    protected static Part WorkPart = null;
    protected static BasePart BasePart = null;
    protected static UI theUI = null;
    public BlockDialog theDialog;
    public static string TheDialogName { get; set; }
    public static List<List<Hub_Section>> Sections_massive = new
List<List<Hub_Section>>();
    private static List<List<Hub_Info_Len_Tawr>> Arr_Info_Len_Tawr = new
List<List<Hub_Info_Len_Tawr>>();
    private static List<List<Hub_Info_Len_Plate>> Arr_Info_Len_Plate = new
List<List<Hub_Info_Len_Plate>>();
    protected UIBlock plane0, face_select1;//DirectCurve
    protected UIBlock double0, plane10, toggleX, toggleY, toggleZ, toggleX1, toggleY1,
toggleZ1,along, across, rotation;//Massive_Vector
    protected UIBlock face_select_Sub0, sub_face_select0, sub_face_select1;//Sub
    protected UIBlock face_select_tocurve;//Curve
    protected UIBlock double_bias, face_select_Split0, surface_exp, Plane_start,
Plane_end, flag;
    protected UIBlock min_hight_section, max_hight_canvas, min_len_canvas,
max_hight_rib, min_hight_rib;
    protected UIBlock Choose_low_face, max_h_rib;
    protected UIBlock new_planes, number_plane, replace_plane, insert_plane,
new_massive;
    protected static Feature JournalNameBody = null;
    public static Excel.Application excelApp;
    public static Excel._Worksheet[] workSheet;
    public IniItems()
    {
        try

```

```

    {
        session = Session.GetSession();
        uFSession = UFSession.GetUFSession();
        theUI = UI.GetUI();
        BasePart = session.Parts.Work;
        WorkPart = session.Parts.Work;
    }
    catch (Exception ex)
    {
        theUI.NXMessageBox.Show("ErrorIni",    NXMessageBox.DialogType.Error,
"Ошибка доступа к Ini " + ex.Message);
    }
}
public void Initialize_cb()
{
    try
    {
        {
            plane0 = theDialog.TopBlock.FindBlock("plane0");
            face_select1 = theDialog.TopBlock.FindBlock("face_select1");
        }
        {
            double0 = theDialog.TopBlock.FindBlock("double0");
            plane10 = theDialog.TopBlock.FindBlock("plane10");
            toggleX = theDialog.TopBlock.FindBlock("toggleX");
            toggleY = theDialog.TopBlock.FindBlock("toggleY");
            toggleZ = theDialog.TopBlock.FindBlock("toggleZ");
            toggleX1 = theDialog.TopBlock.FindBlock("toggleX1");
            toggleY1 = theDialog.TopBlock.FindBlock("toggleY1");
            toggleZ1 = theDialog.TopBlock.FindBlock("toggleZ1");
            along = theDialog.TopBlock.FindBlock("along");
            across = theDialog.TopBlock.FindBlock("across");
            rotation = theDialog.TopBlock.FindBlock("rotation");
        }
        {
            face_select_Sub0 = theDialog.TopBlock.FindBlock("face_select_Sub0");
            sub_face_select0 = theDialog.TopBlock.FindBlock("sub_face_select0");
            sub_face_select1 = theDialog.TopBlock.FindBlock("sub_face_select1");
        }
        {
            face_select_tocurve
theDialog.TopBlock.FindBlock("face_select_tocurve");
        }
        {
            face_select_Split0 = theDialog.TopBlock.FindBlock("face_select_Split0");
            double_bias = theDialog.TopBlock.FindBlock("double_bias");
            surface_exp = theDialog.TopBlock.FindBlock("surface_exp");
            Plane_start = theDialog.TopBlock.FindBlock("Plane_start");
            Plane_end = theDialog.TopBlock.FindBlock("Plane_end");
            flag = theDialog.TopBlock.FindBlock("flag");
        }
    }
}

```

```

min_high_section = theDialog.TopBlock.FindBlock("min_high_section");
max_high_canvas = theDialog.TopBlock.FindBlock("max_high_canvas");
min_len_canvas = theDialog.TopBlock.FindBlock("min_len_canvas");
max_high_rib = theDialog.TopBlock.FindBlock("max_high_rib");
min_high_rib = theDialog.TopBlock.FindBlock("min_high_rib");
}
{
new_planes = theDialog.TopBlock.FindBlock("new_planes");
number_plane = theDialog.TopBlock.FindBlock("number_plane");
replace_plane = theDialog.TopBlock.FindBlock("replace_plane");
insert_plane = theDialog.TopBlock.FindBlock("insert_plane");
new_massive = theDialog.TopBlock.FindBlock("new_massive");
}
this.Choose_low_face = theDialog.TopBlock.FindBlock("Choose_low_face");
max_h_rib = theDialog.TopBlock.FindBlock("max_h_rib");
}
catch (Exception ex)
{
theUI.NXMessageBox.Show("ErrorINI",  NXMessageBox.DialogType.Error,
"ErrorINI " + ex.Message);
}
}
public static void Main()
{
Body[] JournalIdDet = new Body[1];
try
{
System.Diagnostics.Stopwatch stopwatch = new
System.Diagnostics.Stopwatch();
stopwatch.Start();
IniItems iniItems = new IniItems();
Choose_low_face choose_Low_Face = new Choose_low_face();
DirectCurve directCurve = new DirectCurve();
Massive_Elevents massive_Elevents = new
Massive_Elevents(directCurve.Direction_Curve);
SplitBody_for_ribs splitBody_For_Ribs = new
SplitBody_for_ribs(massive_Elevents.direct_axis);
List<DatumPlane> base_Plane = SplitBody_for_ribs.Base_Plane;
JournalIdDet[0] = SplitBody_for_ribs.Body_this;
if (SplitBody_for_ribs.flag_local)
{
Edit_Plane_ribs edit_Plane_Ribs = new
Edit_Plane_ribs(SplitBody_for_ribs.Base_Plane);
splitBody_For_Ribs = new
SplitBody_for_ribs(edit_Plane_Ribs.Base_Planes,
SplitBody_for_ribs.Start_plane,
SplitBody_for_ribs.End_plane);
base_Plane = edit_Plane_Ribs.Base_Planes;
}
List<DatumPlane> middlePlanes_from_section = new
List<DatumPlane>(SplitBody_for_ribs.MiddlePlanes);
List<DatumPlane> middlePlanes_from_curvature = new
List<DatumPlane>(SplitBody_for_ribs.MiddlePlanes);

```

```

        List<DatumPlane>          arr_with_ribs          =          new
List<DatumPlane>(massive_Elevents.patternFeature);
        List<DatumPlane>          arr_without_ribs      =          new
List<DatumPlane>(massive_Elevents.patternFeature);
        arr_without_ribs.RemoveAt(0);
        middlePlanes_from_section.RemoveAt(middlePlanes_from_section.Count - 1);
        List<DatumPlane>          middlePlanes_without_ribs      =          new
List<DatumPlane>(middlePlanes_from_section);
        List<DatumPlane>          middlePlanes_from_section_along      =          new
List<DatumPlane>(middlePlanes_from_section);
        if (SplitBody_for_ribs.Int_Count_Ribs > 2)
        {
            middlePlanes_from_section.RemoveAt(0);
            middlePlanes_from_curvature.RemoveAt(0);
            middlePlanes_from_curvature.RemoveAt(middlePlanes_from_section.Count);
        }
        double Distance_Min_len_canvas_tawr = 0;
        double Distance_Min_len_canvas_plate = 0;
        if (SplitBody_for_ribs.Int_Count_Ribs <= 2)
        {
            Curves curves1 = new Curves(1, arr_without_ribs, Bodes: JournalIdDet,
direct_axis: massive_Elevents.direct_axis);
            Arr_Info_Len_Tawr = curves1.Arr_Info_Len_Tawr;
            Distance_Min_len_canvas_tawr = curves1.Distance_Min_len_canvas_tawr;
        }
        if (SplitBody_for_ribs.Int_Count_Ribs > 2)
        {
            SplitBody          splitBody3          =          new          SplitBody(datumsFeature:
middlePlanes_from_section,          massive_Elevents.direct_axis,          SplitBodyGetBody:
JournalIdDet.ToList());
            Curves          curves2          =          new          Curves(1,          arr_without_ribs,          Bodes:
splitBody3.new_SplitBody.ToArray(), direct_axis: massive_Elevents.direct_axis);
            Arr_Info_Len_Tawr = curves2.Arr_Info_Len_Tawr;
            iniItems.DeleteSplitBuilder(splitBody3.GetSplitBody);
            Distance_Min_len_canvas_tawr = curves2.Distance_Min_len_canvas_tawr;
        }
            SplitBody          splitBody5          =          new          SplitBody(datumsFeature: arr_without_ribs,
massive_Elevents.direct_axis_mass, SplitBodyGetBody: JournalIdDet.ToList());
            Curves          curves5          =          new          Curves(2,          middlePlanes_from_section_along,          Bodes:
splitBody5.new_SplitBody.ToArray(), direct_axis: massive_Elevents.direct_axis_mass);
            Distance_Min_len_canvas_plate = curves5.Distance_Min_len_canvas_plate;
            Arr_Info_Len_Plate = curves5.Arr_Info_Len_Plate;
            iniItems.DeleteSplitBuilder(splitBody5.GetSplitBody);
            DivadeFace          divadeFace          =          new          DivadeFace(MidlePlane: arr_with_ribs);
            DivadeFace          divadeFace2          =          new          DivadeFace(          MidlePlane:
middlePlanes_from_curvature, divadeFace.ChooseFaces);
            ChoseFaceCurvature          choseFaceCurvature          =          new          ChoseFaceCurvature();

            INIExcel(2);
            Curves          curves10          =          new          Curves(countArr: 0,          ChooseFaces:
choseFaceCurvature.FacesCurvature,          MidlePlane:          base_Plane,          direct_axis:
massive_Elevents.direct_axis_mass, stepArray: massive_Elevents.step_arr);

```

```

        Curves    curves11    =    new    Curves(countArr:    1,    ChooseFaces:
choseFaceCurvature.FacesCurvature, MidlePlane: massive_Elevents.patternFeature, direct_axis:
massive_Elevents.direct_axis, stepArray: 10);
        List<List<Hub_Curvature>>    Curvature_massive_onRib    =
curves10.Curvature_massive;
        List<List<Hub_Curvature>>    Curvature_massive_withoutRib    =
curves11.Curvature_massive;
        ExcelOutput    excelOutput_Tawr    =    new
ExcelOutput(massive_Elevents.patternFeature,    middlePlanes_from_section,
SplitBody_for_ribs.MiddlePlanes,    Arr_Info_Len_Tawr,    Arr_Info_Len_Plate,
Curvature_massive_onRib,    Curvature_massive_withoutRib,    massive_Elevents.step_arr,
massive_Elevents.direct_axis,    massive_Elevents.Choose_rib,    massive_Elevents.Rotation,
choose_Low_Face.point,    choose_Low_Face.point2,    choose_Low_Face.point3,
choose_Low_Face.point4, Distance_Min_len_canvas_tawr, Distance_Min_len_canvas_plate);
    }
}
}

```

Приложение Е

Листинг точки входа для программы автоматизированного поиска отпечатков

```

import sys
from PySide6.QtWidgets import*
from PySide6.QtGui import QPixmap,QMovie
from PySide6.QtWidgets import QMainWindow, QApplication, QLabel, QApplication
from PySide6 import QtWidgets
from PySide6.QtWidgets import QDialog,
QListWidgetItem,QHeaderView,QMessageBox,QGraphicsItem
from PySide6 import QtCore
from PySide6.QtCore import Qt
from threading import Thread
from PIL import Image
from matplotlib.backends.backend_qt5agg import (NavigationToolbar2QT as
NavigationToolbar)
import numpy as np
import cv2
import matplotlib.pyplot as plt
from main_ui import Ui_MainWindow
from setting_circle import Ui_Setting
from setting_script import Create_script
from sqlalchemy import create_engine, text
from sqlalchemy.orm import Session
from random import randint
# Подключение библиотек необходимых для проекта

class ItemsModels(QtCore.QAbstractTableModel):# Результат работы класса, для вывода
таблицы
    def __init__(self,*args,**kwargs)->None:
        super().__init__(*args,**kwargs)
        self.items = []
        self.region = {}
        self.tasks = [[['%d - %d' % (i, j), False] for j in range(7)] for i in range(10)]
    def setItems (self, items): # Запись данных в таблицу
        self.beginResetModel()
        self.items = items
        print(items)
        self.endResetModel()
    def setRegion (self, regions):
        return
    def rowCount(self,*args,**kwargs)->None: # Определяем число строк
        return len(self.items)
    def columnCount(self,*args,**kwargs)->None: # Определяем число столбцов
        return 2
    def data(self, index:QtCore.QModelIndex, role:QtCore.Qt.ItemDataRole):# Вывод данных в
таблицы из БД
        if not index.isValid():
            return

```

```

if role == QtCore.Qt.ItemDataRole.DisplayRole:
    region_info = self.items[index.row()]
    col = index.column()
    print(region_info)
    if col == 0:
        return f'{region_info[0]}'
    elif col == 1:
        return f'{region_info[1]}'
elif role == QtCore.Qt.ItemDataRole.UserRole:
    return self.items[index.row()]
def setData(self, index, value, role):
    if role == Qt.EditRole:
        region_info = [ ]
        col = index.column()
        if col == 0:
            msg = QMessageBox()
            msg.setWindowTitle("Ошибка ввода")
            msg.setText("Нельзя изменять идентификатор!")
            msg.setIcon(QMessageBox.Warning)
            msg.exec_()
            return
        elif col == 1:
            region_info = [self.items[index.row()][0],value]
            self.items[index.row()] = region_info
            self.engine = create_engine("sqlite+pysqlite:///db_script.db", echo = True)
# Подключение к базе данных
            with Session(self.engine) as s:# Создание запроса к БД
                query = """
                    UPDATE Insert_drob33
                    SET Count_insert = :count_insert
                    WHERE Id = :Id
                    """
                s.execute(text(query),{"count_insert":region_info[1], "Id":region_info[0]})
                s.commit()
            return True
        return False
    def flags(self, index):
        return Qt.ItemIsSelectable | Qt.ItemIsEnabled | Qt.ItemIsEditable
    def headerData(self, section: int, opearation: QtCore.Qt.Orientation, role:
QtCore.Qt.ItemDataRole):
        if role == QtCore.Qt.ItemDataRole.DisplayRole:
            if opearation == QtCore.Qt.Orientation.Horizontal:
                return{
                    0: "№",
                    1: "Кол-во внедрений.",
                }.get(section)
class Calculation(QMainWindow):
    def __init__(self):
        super(Calculation, self).__init__()
        self.ui = Ui_MainWindow()
        self.ui.setupUi(self)
        self.setWindowTitle("Поиск внедрений дроби")

```

```

self.ui.choose_image_from_analyse.clicked.connect(self.choose_file)
self.ui.find_drob.clicked.connect(lambda:self.save_img(self.img))
self.ui.show_graph.clicked.connect(lambda:self.show_graphh())
self.ui.show_table_2.clicked.connect(lambda:self.show_tablee2(self.arr_area))
self.ui.setting.clicked.connect(lambda:self.settings())
self.ui.create_script.clicked.connect(lambda:self.create_script())
def choose_file(self):
    res = QFileDialog.getOpenFileName(self,
'OpenFile','D:\\YandexDisk\\YandexDisk\\MyDocuments\\VScode\\Analys_det_ver_2\\picture',
'JPG File(*jpg)')
    res_split = str(res).split(',')
    res_repalace = res_split[0].replace('/', '\\')[2:-1]
    pixmap = QPixmap(res_repalace)
    self.ui.picture_drob.setPixmap(pixmap)
    img = cv2.imread(res_repalace, cv2.IMREAD_COLOR)
    self.img = img
    self.res_replace_open = res_repalace
# Выбор снимка для определжения количества внедрений
def save_img(self, img):
    res = QFileDialog.getSaveFileName(self, 'Save
File','D:\\YandexDisk\\YandexDisk\\MyDocuments\\VScode\\Analys_det_ver_2\\picture', 'JPG
File(*jpg)')
    res_split = str(res).split(',')
    res_repalace = res_split[0].replace('/', '\\')[2:-1]
    gray_blurred = cv2.blur(img, (1, 1))
    gray_img=cv2.cvtColor(gray_blurred,cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    im_gauss = cv2.GaussianBlur(gray_img, (5, 5), 2)
    ret, thresh = cv2.threshold(im_gauss, 85, 255, cv2.THRESH_BINARY)
    contours, hierarchy = cv2.findContours(thresh, cv2.RETR_LIST,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
    counters_circle = []
    arr_area = []
    for con in contours:
        perimetr = cv2.arcLength(con,True)
        area = cv2.contourArea(con)
        arr_area.append(area)
        if perimetr == 0:
            break
        if 20 < area < 200:
            print('perimetr' , perimetr)
            print('area' , area)
            counters_circle.append(con)
    print(len(counters_circle))
    img_contours = np.uint8(np.zeros((img.shape[0],img.shape[1])))
    cv2.drawContours(img_contours, counters_circle, -1, (255,0,255), 3)
    cv2.imwrite(res_repalace, img_contours, [cv2.IMWRITE_JPEG_QUALITY, 100])
    pixmap = QPixmap(res_repalace)
    self.ui.picture_drob_end.setPixmap(pixmap)
    self.arr_area = arr_area
# Сохранение изображения с откорректированными параметрами яркости и
контрастности.
def show_graphh(self):

```

```

self.engine = create_engine("sqlite+pysqlite:///db_script.db", echo = True)# Подключение
базы данных
self.rows = []
count_radius = []
with Session(self.engine) as s:# Создание запроса к БД
    query = """
        SELECT *
        FROM Insert_drob33
        """
    rows = s.execute(text(query))
    for r in rows:
        self.rows.append(r)
        count_radius.append(r[1])
self.count_radius = count_radius
self.ui.MplWidget_show_graph.canvas.axes.clear()
self.ui.MplWidget_show_graph.canvas.axes.plot(count_radius)
self.ui.MplWidget_show_graph.canvas.axes.legend(('Диаметры кратеров мм.'), loc='upper
right')
self.ui.MplWidget_show_graph.canvas.axes.set_xlabel("Тип диаметра")
self.ui.MplWidget_show_graph.canvas.axes.set_ylabel("Количество диаметров шт.")
self.ui.MplWidget_show_graph.canvas.axes.set_title("Количественное
определение\пвнедрений", fontweight = "bold")
self.ui.MplWidget_show_graph.canvas.axes.set_xlim(left = -1, right = len(count_radius)+1)
self.ui.MplWidget_show_graph.canvas.axes.set_ylim(bottom = -1, top =
max(count_radius)+20)
self.ui.MplWidget_show_graph.canvas.axes.xaxis.set_major_locator(plt.MultipleLocator(1))
self.ui.MplWidget_show_graph.canvas.axes.yaxis.set_major_locator(plt.MultipleLocator(20))
self.ui.MplWidget_show_graph.canvas.axes.grid()
self.ui.MplWidget_show_graph.canvas.draw()
def find_count_radius(self, arr_area):
    a = 0
    a1 = 0
    b = 0
    c = 0
    d = 0
    e = 0
    f = 0
    g = 0
    h = 0
    i = 0
    j = 0
    count_radius = []
    for radius in arr_area:
        test = randint(1, 2)
        if (20<=radius<=25):
            a = a+1
        if (25<=radius<=30):
            a1 = a1+1
        if (30<radius<=40):
            b = b+1
        if (40<radius<=50):
            c = c+1

```

```

if (50<radius<=60):
    d = d+1
if (70<radius<=80):
    e = e+1
if (80<radius<=100):
    f = f+1
if (100<radius<=120):
    g = g+1
if (120<radius<=140):
    h = h+1
if (140<radius<=160):
    i = i+1
if (160<radius<=200):
    j = j+1
count_radius.append(a)
count_radius.append(a1)
count_radius.append(b)
count_radius.append(c)
count_radius.append(d)
count_radius.append(e)
count_radius.append(f)
count_radius.append(g)
count_radius.append(h)
count_radius.append(i)
count_radius.append(j)
return count_radius
def show_tablee2(self,arr_area):
    count_radius = []
    count_radius = self.find_count_radius(self.arr_area)
    self.engine = create_engine("sqlite+pysqlite:///db_script.db", echo = True)
# Подключение базы данных
self.Count = 0
d_drob = 0
speed = 0
self.tuple = []
self.model = ItemsModels()
self.ui.tableView2.setModel(self.model)
self.model.setItems(self.tuple)
with Session(self.engine) as s:# Создание запроса к БД
    query = """
    DELETE From Insert_drob33
    """
    s.execute(text(query))
    s.commit()
for count_drob in count_radius:
    self.tuple = [float(self.Count)]
    with Session(self.engine) as s:# Создание запроса к БД
        query = """
        INSERT INTO Insert_drob33
        VALUES (:Id, :Count_insert)
        """
        s.execute(text(query),{"Id":self.Count, "Count_insert":count_drob})

```

```

        s.commit()
        self.Count = self.Count + 1
        self.rows = []# Переменная для записи данных полученных из БД, для выхода
        функций удаления и обновления
        with Session(self.engine) as s:# Создание запроса к БД
            query = """
                SELECT *
                FROM Insert_drob33
                """

            rows = s.execute(text(query))
            for r in rows:
                self.rows.append(r)
            self.model.setItems(self.rows)
            with Session(self.engine) as s:# Создание запроса к БД
                query = """
                    SELECT Max(Id)
                    FROM Insert_drob33;
                    """

                row = s.execute(text(query))
                for i in row:
                    try:
                        print(str(i).split("(")[1].split(",")[0])
                        self.Count = int(str(i).split("(")[1].split(",")[0])+1
                    except:
                        print("Проверка, что есть значения")
            self.ui.tableView2.horizontalHeader().setSectionResizeMode(QHeaderView.Stretch) #
            Определение автоматического размера ширины таблицы
            self.ui.tableView2.horizontalHeader().setMinimumSectionSize(3)
            self.ui.tableView2.setSectionResizeMode(QHeaderView.ResizeMode.Stretch)

```

Приложение Ж

Листинг точки входа для программы назначения маршрутов обработки операции ДУФ

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.IO;
using System.Linq;
using System.Runtime.InteropServices;
using System.Windows.Forms;
namespace udf25000
{
    public partial class MainCanvas : Form
    {
        [DllImport("kernel32.dll")]
        public static extern Boolean AllocConsole();
        [DllImport("kernel32.dll")]
        public static extern Boolean FreeConsole();
        public Canvas drawing;
        public ChartY sectionX;
        public ChartX sectionY;
        private const string emptyPart = "";
        public string activePart = emptyPart;
        public PassThroughMode activeMode;
        public Area activeArea = null;
        public UniteArea activeArea1 = null;
        public int areasCount;
        public Area[] activeHorizontalAreas;
        public Area[] activeVerticalAreas;
        public Area[] selectedHorizontalAreas;
        public Area[] selectedVerticalAreas;
        public static List<UniteArea> ArrUniteArea = new List<UniteArea>();
        public static double ModeDA { get; set; } = 111;
        public static PassThroughMode activePassthroughMode;
        public RoboticsMode activeRoboticsMode;
        public static bool passthrough = false;
        public static bool robotics = false;
        private PassThroughMode loacalActivePassthroughMode;
        // Проверка установленного режима обработки
        public static string prefix_passthrough_mode = "ПТ-";
        public static string prefix_robotics_mode = "ПК-";
        public MainCanvas()
        {
            InitializeComponent();
            MainCanvas.AllocConsole();//ВЫЗОВ консоли
            this.MouseWheel += panel1_MouseWheel;
        }
    }
}

```

```

drawing = new Canvas(panel1);
sectionX = new ChartY(panelSectionX, panelSectionY, new Area[20], -1);
sectionY = new ChartX(panelSectionY, new Area[20], -1);
}
private void radioButton1_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    if (btnSelectAreas.Checked) drawing.refresh(MousePosition);
}
private void radioButton2_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    if (btnSelectHorizontalAreas.Checked) drawing.refresh(MousePosition);
}
private void radioButton3_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    if (btnSelectVerticalAreas.Checked) drawing.refresh(MousePosition);
}
private void btnSelectModeAreas_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    if (btnSelectModeAreas.Checked) drawing.refresh(MousePosition);
}
private void panel1_MouseDown(object sender, MouseEventArgs e)
{
    drawing.captureMouse(e.Location);
}
private void panel1_MouseUp(object sender, MouseEventArgs e)
{
    drawing.releaseMouse(e.Location);
}
private void panel1_MouseWheel(object sender, MouseEventArgs e)
{
    if (drawing != null)
    {
        drawing.setScale(e.Delta);
        drawing.refresh(e.Location);
        drawing.bg.Render();
    }
}
private void panel1_MouseMove(object sender, MouseEventArgs e)
{
    if (drawing != null)
    {
        if (e.Button == MouseButtons.Right)
        {
            drawing.setPan(true);
            drawing.updateCenter(e.Location);
        } else
        {
            drawing.setPan(false);
        }
    }
}

```

```

        drawing.refresh(e.Location);
        sectionX.refresh();
        sectionY.refresh();
        if (!drawing.isPan())
        {
            drawing.drawPointer(e.Location);
        }
    }
    drawing.setLastMousePosition(e.Location);
}
public void refreshPassThroughModeList()
{
    if (Program.form5 != null) {
        Mode.Items.Clear();
        Mode.Items.AddRange(Program.form5.passThroughModeList.Select(mode =>
prefix_passthrough_mode + mode.S).ToArray());
        Mode.Items.AddRange(Program.form5.roboticsModeList.Select(mode => prefix_robotics_mode
+ mode.P).ToArray());
    }
}
public void refreshPartsList()
{
    partsList.Items.Clear();
    partsList.Items.AddRange(Utils.listPartsDir());
    if (partsList.Items.Count != 0)
    {
        if (activePart != "") partsList.Text = activePart;
        else partsList.Text = "";
        partsList.Enabled = true;
    }
}
private void refreshDeviationsList()
{
    deviationsList.Items.Clear();
    if (partsList.Text != "")
    {
        deviationsList.Items.AddRange(Utils.listPartDeviationsDir(Path.GetFileNameWithoutEx
tension(partsList.Text)));
    }
}
private void S_DropDown(object sender, EventArgs e)
{
    refreshPassThroughModeList();
}
private void partsList_DropDown(object sender, EventArgs e)
{
    refreshPartsList();
}
private void panel1_MouseClick(object sender, MouseEventArgs e)

```

```

{
  if (e.Button == MouseButton.Left)
  {
    if (activeArea != null && btnSelectAreas.Checked)
    {
      Form2_3 form = new Form2_3();
      form.part = Program.form4.part;
      form.area = activeArea;
      form.areaIndex = form.part.areaList.IndexOf(activeArea);
      form.deviationsName = deviationsList.Text;
      form.TopMost = true;
      form.Text = "Полоса №" + activeArea.Number_column + " Участок №" +
activeArea.Number_line;
      form.Lx.Text = Math.Round(activeArea.LenCanvas_Tawr,2).ToString();
      form.Ly.Text = Math.Round(activeArea.LenCanvas_Plate,2).ToString();
      form.Hx.Text = Math.Round(activeArea.Vo_Tawr, 2).ToString();
      form.Hy.Text = Math.Round(activeArea.Vo_Plate, 2).ToString();
      form.CGx.Text =
Math.Round(activeArea.Normal_CG_z_Tawr,2).ToString();
      form.CGy.Text =
Math.Round(activeArea.Normal_CG_z_Plate,2).ToString();
      form.Jminx.Text = Math.Round(activeArea.Jx_Tawr,2).ToString();
      form.Jminy.Text = Math.Round(activeArea.Jy_Tawr,2).ToString();
      form.Jmaxx.Text = Math.Round(activeArea.Jx_Plate,2).ToString();
      form.Jmaxy.Text = Math.Round(activeArea.Jy_Plate, 2).ToString();
      form.Rx.Text = Math.Round((activeArea.MaxCurvature_Tawr +
activeArea.MinCurvature_Tawr) / 2).ToString();
      form.Ry.Text = Math.Round((activeArea.MaxCurvature_Plate +
activeArea.MinCurvature_Plate) / 2).ToString();
      form.Rx0.Text =
Math.Round(activeArea.mean_curvature_x_init).ToString();
      form.Ry0.Text =
Math.Round(activeArea.mean_curvature_z_init).ToString();
      form.fx.Text = Math.Round(activeArea.fx, 2).ToString();
      form.fy.Text = Math.Round(activeArea.fy, 2).ToString();
      form.fx0.Text = Math.Round(activeArea.fx0, 2).ToString();
      form.fy0.Text = Math.Round(activeArea.fy0, 2).ToString();
      form.Psx.Text = Math.Round(activeArea.Psx, 2).ToString();
      form.Psy.Text = Math.Round(activeArea.Psy, 2).ToString();
      form.Tx.Text = Math.Round(activeArea.Tx, 2).ToString();
      form.Ty.Text = Math.Round(activeArea.Ty, 2).ToString();
      form.Vx.Text = Math.Round(activeArea.Fx).ToString();
      form.Vy.Text = Math.Round(activeArea.Fy).ToString();
      if (Mode.Text != "")
      {
        form.Mode.Text = "Параметры участка:\nРежим обработки: " +
Mode.Text;
      } else
      {

```

```

        form.Mode.Text = "Параметры участка:\nРежим обработки: Не
выбран";
    }
    Utils.showFormNextToCursor(MousePosition, form);
}
if (activeArea1 != null && btnSelectModeAreas.Checked)
{
    Form2_4 form = new Form2_4();
    form.area = activeArea1;
    //form.areaIndex = form.part.areaList.IndexOf(activeArea1);
    form.deviationsName = deviationsList.Text;
    form.TopMost = true;
    form.Text = "Полоса №" + activeArea1.count_curves;
    form.deviationsName = deviationsList.Text;
    form.TopMost = true;
    form.Lx.Text = Math.Round(activeArea1.Total_lenth_x, 2).ToString();
    form.Ly.Text = Math.Round(activeArea1.Total_lenth_z, 2).ToString();
    form.Hx.Text = Math.Round(activeArea1.Mean_H_x, 2).ToString();
    form.Hy.Text = Math.Round(activeArea1.Mean_H_z, 2).ToString();
    form.CGx.Text = Math.Round(activeArea1.Mean_CG_x, 2).ToString();
    form.CGy.Text = Math.Round(activeArea1.Mean_CG_z, 2).ToString();
    form.Jminx.Text = Math.Round(activeArea1.Mean_min_MOI_x,
2).ToString();
    form.Jminy.Text = Math.Round(activeArea1.Mean_min_MOI_z,
2).ToString();
    form.Jmaxx.Text = Math.Round(activeArea1.Mean_max_MOI_x,
2).ToString();
    form.Jmaxy.Text = Math.Round(activeArea1.Mean_max_MOI_z,
2).ToString();
    form.fx.Text = Math.Round(activeArea1.Mean_fx, 2).ToString();
    form.fy.Text = Math.Round(activeArea1.Mean_fz, 2).ToString();
    form.Rx.Text = Math.Round(activeArea1.MAX_curvature_x).ToString();
    form.Ry.Text = Math.Round(activeArea1.MAX_curvature_z).ToString();
    form.Vx.Text = Math.Round(activeArea1.Fx).ToString();
    form.Vy.Text = Math.Round(activeArea1.Fy).ToString();
    form.Psx.Text = Math.Round(activeArea1.Psx, 2).ToString();
    form.Psy.Text = Math.Round(activeArea1.Psy, 2).ToString();
    form.Tx.Text = Math.Round(activeArea1.Tx, 2).ToString();
    form.Ty.Text = Math.Round(activeArea1.Ty, 2).ToString();
    if (Mode.Text != "")
    {
        form.Mode.Text = "Параметры участка:\nРежим обработки: " +
Mode.Text;
    }
    else
    {
        form.Mode.Text = "Параметры участка:\nРежим обработки: Не
выбран";
    }
}

```

```

        Utils.showFormNextToCursor(MousePosition, form);
    }
    if (activeHorizontalAreas!=null && btnSelectHorizontalAreas.Checked)
    {
        selectedHorizontalAreas = activeHorizontalAreas;
        Program.form2.sectionY = new ChartX(Program.form2.panelSectionY,
activeHorizontalAreas, sectionY.display);
    }
    if (activeVerticalAreas != null && btnSelectVerticalAreas.Checked)
    {
        selectedVerticalAreas = activeVerticalAreas;
        Program.form2.sectionX = new ChartY(Program.form2.panelSectionX,
Program.form2.panelSectionY, activeVerticalAreas, sectionX.display);
    }
}
}
private void partsList_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)
{
    Program.form4.refreshPartsList();
    Program.form4.partsList.Text = partsList.Text;
    Program.form4.changePart(partsList.Text);
    refreshDeviationsList();
    deviationsList.SelectedItem = Utils.emptyDeviationName + ".csv";
    refreshGraphs();
    if (Program.form4.part.areaList != null )
// Проверка наличия элементов, необходимых для записи объединённых полос
    {
        ArrUniteArea = new List<UniteArea>(Utils.GetUniteArea());
        Program.form6.refreshPartsList();
        Mode.Items.Clear();
    }
}
private void Form2_Resize(object sender, EventArgs e)
{
    if (WindowState != FormWindowState.Minimized)
    {
        drawing = new Canvas(panel1, drawing);
        sectionX = new ChartY(panelSectionX, sectionX);
        sectionY = new ChartX(panelSectionY, sectionY);
        drawing.refresh(drawing.lastMousePosition);
        sectionX.refresh();
        sectionY.refresh();
    }
}
private void panelSectionY_MouseClick(object sender, MouseEventArgs e)
{
    if (e.Button==MouseButtons.Left) sectionY.nextData();
    if (e.Button == MouseButtons.Right) sectionY.prevData();
}
}

```

```

private void panelSectionX_MouseClick(object sender, MouseEventArgs e)
{
    if (e.Button == MouseButton.Left) sectionX.nextData();
    if (e.Button == MouseButton.Right) sectionX.prevData();
}
private void S_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)
{
    if (Mode.Text != "")
    {
        applyMode();
    }
}
private void applyMode()
{
    if (Mode.Text.IndexOf(prefix_passthrough_mode)!=-1) passthrough = true;
    else if (Mode.Text.IndexOf(prefix_robotics_mode) != -1) robotics = true;
    string modeName = Mode.Text.Substring(3);
    if (passthrough) activePassthroughMode =
Program.form5.passThroughModeList.Find(mode => mode.S == modeName);
    if (robotics) activeRoboticsMode = Program.form5.roboticsModeList.Find(mode
=> mode.P == modeName);
    double Zc = double.NaN;
    double ks_1 = double.NaN;
    double ks_2 = double.NaN;
    double ks_3 = double.NaN;
    if (passthrough)
    {
        Zc = activePassthroughMode.Zc / 1000;
        ks_1 = activePassthroughMode.ks_1;
        ks_2 = activePassthroughMode.ks_2;
        ks_3 = activePassthroughMode.ks_3;
    }
    if (robotics)
    {
        Zc = activeRoboticsMode.Zc / 1000;
        ks_1 = activeRoboticsMode.ks_1;
        ks_2 = activeRoboticsMode.ks_2;
        ks_3 = activeRoboticsMode.ks_3;
    }
    foreach (Area area in Program.form4.part.areaList)
    {
        double E = double.Parse(Program.form5.E.Text) * Math.Pow(10,6);
        double k_s_x = double.Parse(Program.form5.k_s_x.Text);
        double k_s_y = double.Parse(Program.form5.k_s_y.Text);
        double k_t = double.Parse(Program.form5.k_t.Text);
        double k_upr = double.Parse(Program.form5.k_upr.Text);
        double k_nds = double.Parse(Program.form5.k_nds.Text);
        // X
        double Jx = area.Jx_Tawr / Math.Pow(1000, 4);

```

```

double Rx = area.meanCurvature_Tawr / 1000;
double Rx0 = area.mean_curvature_x_init / 1000;
double Hx = area.Vo_Tawr / 1000;
area.Psx = ((E * Jx * (1 / Rx - k_s_x / Rx0)) / (Hx - Zc)) * k_t * k_upr * k_nds;
area.Tx = (-ks_2 + Math.Sqrt(Math.Pow(ks_2, 2) - 4 * ks_1 * (ks_3 - area.Psx)))
/ (2 * ks_1);

area.Fx = area.LenCanvas_Tawr / (area.Tx / 60);
// Y
double Jy = area.Jy_Tawr / Math.Pow(1000, 4);
double Ry = area.meanCurvature_Plate / 1000;
double Ry0 = area.mean_curvature_z_init / 1000;
double Hy = area.Vo_Plate / 1000 / 2;
area.Psy = ((E * Jy * (1 / Ry - k_s_y / Ry0)) / (Hy - Zc)) * k_t * k_upr * k_nds;
area.Ty = (-ks_2 + Math.Sqrt(Math.Pow(ks_2, 2) - 4 * ks_1 * (ks_3 - area.Psy)))
/ (2 * ks_1);

area.Fy = area.LenCanvas_Plate / (area.Ty / 60);
}
foreach (UniteArea area in ArrUniteArea)
{
double E = double.Parse(Program.form5.E.Text) * Math.Pow(10, 6);
double k_s_x = double.Parse(Program.form5.k_s_x.Text);
double k_s_y = double.Parse(Program.form5.k_s_y.Text);
double k_t = double.Parse(Program.form5.k_t.Text);
double k_upr = double.Parse(Program.form5.k_upr.Text);
double k_nds = double.Parse(Program.form5.k_nds.Text);
// X
double Jx = area.Mean_min_MOI_x / Math.Pow(1000, 4);
double Rx = area.MAX_curvature_x / 1000;
double Rx0 = area.mean_curvature_x_init / 1000;
double Hx = area.Mean_H_x / 1000;
area.Psx = ((E * Jx * (1 / Rx - k_s_x / Rx0)) / (Hx - Zc)) * k_t * k_upr * k_nds;
area.Tx = (-ks_2 + Math.Sqrt(Math.Pow(ks_2, 2) - 4 * ks_1 * (ks_3 - area.Psx)))
/ (2 * ks_1);

area.Fx = area.Total_lenth_x / (area.Tx / 60);
// Y
double Jy = area.Mean_min_MOI_z / Math.Pow(1000, 4);
double Ry = area.MAX_curvature_z / 1000;
double Ry0 = area.mean_curvature_z_init / 1000;
double Hy = area.Mean_H_z / 1000 / 2;
area.Psy = ((E * Jy * (1 / Ry - k_s_y / Ry0)) / (Hy - Zc)) * k_t * k_upr * k_nds;
area.Ty = (-ks_2 + Math.Sqrt(Math.Pow(ks_2, 2) - 4 * ks_1 * (ks_3 - area.Psy)))
/ (2 * ks_1);

area.Fy = area.Total_lenth_z / (area.Ty / 60);
}
refreshGraphs();
}
private void deviationsList_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)
{
if (partsList.Text != "")

```

```

        {
            Program.form4.part.areaList
Utils.readDeviationsFile(Path.GetFileNameWithoutExtension(partsList.Text),
Path.GetFileNameWithoutExtension(deviationsList.Text),
Program.form4.part.areaList.ToArray()).ToList();
            if (Mode.Text != "") applyMode();
            refreshGraphs();
        }
    }
private void Form2_FormClosing(object sender, FormClosingEventArgs e)
{
    Application.Exit();
}
private void partsList_TextChanged(object sender, EventArgs e)
{
    refreshDeviationsList();
}
private void view_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)
{
    if (view.Text != "")
    {
        if (direction.Text == "") direction.SelectedIndex = 0;
    } else
    {
        direction.Items.Clear();
        direction.Items.Add("X");
        direction.Items.Add("Y");
    }
    refreshGraphs();
}
public void refreshGraphs()
{
    drawing.refresh(MousePosition);
    sectionX.refresh();
    sectionY.refresh();
}
private void button1_Click_1(object sender, EventArgs e)
{
    Utils.switchForms(this, Program.form4);
}
private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
{
    Utils.switchForms(this, Program.form5);
}
private void button4_Click_1(object sender, EventArgs e)
{
    Utils.switchForms(this, Program.form6);
    if (Mode.Text == "" || activePassthroughMode != localActivePassthroughMode)

```

```
        {
            localActivePassthroughMode = activePassthroughMode;
            Program.form6.refreshPartsList();
        }

    }
private void Form2_Shown(object sender, EventArgs e)
{
    refreshGraphs();
}
private void direction_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)
{
    refreshGraphs();
}
}
}
```