

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

На правах рукописи



Минаев Николай Владимирович
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
ОРЕБРЁННЫХ ПАНЕЛЕЙ РАСКАТКОЙ РОЛИКАМИ И
ДРОБЕУДАРНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Пашков Андрей Евгеньевич

Иркутск – 2026

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение..... | 4 |
| 1 Конструктивно-технологические особенности деталей типа монолитно-фрезерованных панелей..... | 11 |
| 1.1 Конструктивные особенности деталей | 11 |
| 1.2 Существующие технологии формообразования крупногабаритных панелей | 13 |
| 1.3 Теоретические и экспериментальные исследования технологического процесса формообразования панелей | 25 |
| 1.4 Постановка цели и задач исследования | 42 |
| 2 Моделирование процесса формообразования панели с продольным ребрением в технологическом сочетании “раскатка рёбер – дробеударное формообразование” | 45 |
| 2.1 Общие положения | 45 |
| 2.2 Прогнозирование продольной деформации панелей на основе моделирования процесса дробеударного формообразования | 47 |
| 2.3 Моделирование процесса раскатки роликами рёбер панелей | 54 |
| 2.3.1 Исследование напряженно-деформированного состояния материала деталей, формируемого раскаткой роликами..... | 57 |
| 2.3.2 Проверка достоверности конечно-элементной модели раскатки роликами. | 68 |
| 2.3.3 Оценка применимости расчётных моделей..... | 72 |
| 2.4 Оценка взаимовлияния соседних рёбер при их последовательной обработке..... | 75 |
| Выводы по главе..... | 81 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 3 | Изучение технологического процесса формообразования панелей в последовательности “раскатка рёбер – дробеударное формообразование” | 83 |
| 3.1 | Тарировка оборудования для раскатки роликами | 83 |
| 3.2 | Исследование процесса формообразования образца панели с ребрами прямоугольного сечения в последовательности РР–ДУФ | 93 |
| 3.3 | Исследование процесса формообразования образца панели с ребрами Г-образного сечения в последовательности РР–ДУФ | 99 |
| | Выводы по главе | 104 |
| 4 | Практическая реализация результатов исследования | 105 |
| 4.1 | Методика расчета технологических параметров процесса раскатки рёбер при формообразовании панелей в последовательности РР–ДУФ | 105 |
| 4.2 | Описание расчетной программы | 109 |
| 4.3 | Разработка оборудования с ЧПУ для раскатки рёбер монолитнофрезерованных панелей | 113 |
| 4.4 | Разработка технологического процесса формообразования в последовательности раскатка рёбер – ДУФ | 120 |
| | Выводы по главе | 123 |
| | Заключение | 124 |
| | Список сокращений и условных обозначений | 127 |
| | Список литературы | 128 |
| | Приложение А (справочное) | 140 |
| | Приложение Б (обязательное) | 147 |
| | Приложение В (обязательное) | 148 |

Введение

Актуальность темы исследования

В современном машиностроении, в таких отраслях, как самолёто-, ракето- и судостроение широко используются обводообразующие детали в виде крупногабаритных монолитно-фрезерованных панелей сложной формы с продольным оребрением (далее – панели). Использование таких деталей обусловлено стремлением увеличить прочность, жесткость конечного изделия и уменьшить его массу.

Наиболее сложным является производство длинномерных панелей двойной кривизны, заготовки которых создаются фрезерованием на станках с ЧПУ; затем выполняется формообразование. Формообразующие операции отличаются высокой сложностью и трудоемкостью вследствие больших габаритных размеров деталей, малой кривизны поверхности и наличия подкрепляющего набора. При этом на большинстве российских авиастроительных предприятий формообразование панелей реализуется методом прессовой гибки на оборудовании с ручным управлением. Этот способ не обеспечивает требуемую точность формы деталей, высокотрудоемкий и зависит от квалификации исполнителей.

В то же время в отечественной практике известно применение комбинированной технологии, представляющей собой сочетание операций дробеударного формообразования (ДУФ) и раскатки роликами (РР) подкрепляющих ребер. Преимущество данного способа заключается в разделении процесса на простые, легко управляемые и контролируемые операции. Операция ДУФ, реализуемая на специальных установках контактного типа, используется для получения поперечной кривизны, а РР – для образования продольной кривизны и компенсации нежелательного формоизменения детали, образующегося при дробеобработке.

По сравнению с операциями прессовой гибки процесс РР более перспективен: отличается простотой обработки и последующего контроля; габариты деталей не влияют на технологические возможности; размеры оборудования достаточно компактные. Комбинированная технология РР–ДУФ была апробирована в опытно-

промышленном производстве; при этом операция РР реализовывалась ручным инструментом методом последовательного приближения формы детали к требуемой в связи с отсутствием управляемого оборудования и достоверных методик расчёта технологических параметров.

Задача достижения высокой точности формы панелей (с отклонениями контура порядка 0,5 мм) может быть решена путём создания специализированного оборудования для РР с числовым программным управлением (ЧПУ). Для эффективного использования данного оборудования необходима методика, которая позволит произвести расчет требуемых технологических параметров и выполнить программирование процесса РР с использованием электронной модели детали.

Степень разработанности темы

Анализ литературных источников показывает, что, несмотря на то, что теоретические основы процессов ДУФ и РР достаточно хорошо изучены, а эффективность комбинированной технологии формообразования подкреплённых рёбрами панелей, представляющей последовательность указанных операций, подтверждена опытно-промышленными испытаниями, сохраняется ряд нерешённых проблем.

Существующие методики определения технологических параметров процесса РР связаны с подбором эмпирических коэффициентов или проведением дорогостоящих опытных работ на конструктивно-подобных образцах, не обеспечивают требуемую точность расчетов и отличаются высокой трудоёмкостью.

Для эффективной реализации процесса РР необходимо автоматизированное оборудование, а также специализированное программное обеспечение для расчета режимных параметров процесса РР и генерации управляющих программ.

Таким образом, несмотря на известность основных принципов технологии РР-ДУФ, отсутствует целостный научно-практический подход к ее реализации на основе прогнозного моделирования и автоматизации, что и определило предмет настоящего исследования.

Исходя из вышеизложенного, была сформулирована **цель диссертационной работы**: совершенствование технологического сочетания “раскатка роликами –

дробеударное формообразование” (РР-ДУФ) при изготовлении деталей типа монолитно-фрезерованных панелей сложной формы с продольным оребрением на основе повышения достоверности методики расчета технологических параметров за счёт применения систем инженерного анализа и использования автоматизированного оборудования.

Для достижения поставленной цели необходимо **решить следующие задачи:**

1. Разработать методику определения исходных данных для расчета технологических параметров процесса формообразования панелей раскаткой рёбер роликами, основанной на прогнозировании продольной компоненты двухосного изгиба от последующей дробеударной обработки с целью компенсации влияния технологической наследственности.

2. Разработать метод определения режимов ДУФ на основе подбора эквивалентной нагрузки, полученной в результате параметрического конечно-элементного моделирования.

3. Оценить степень взаимовлияния соседних рёбер подкреплённой панели в процессе реализации операции РР с целью формирования продольной кривизны детали.

4. Разработать методику и выполнить моделирование процесса РР с применением систем нелинейного конечно-элементного анализа для изучения закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) детали.

5. Разработать конечно-элементную модель для определения режимов РР рёбер панелей, обеспечивающих заданную продольную кривизну, на основе моделирования на образцах в виде расчётных участков деталей, тем самым исключая необходимость их опытной обработки.

6. Создать специализированное программное обеспечение, для автоматизации расчёта режимов РР и генерации управляющих программ для обработки на оборудовании с ЧПУ.

7. Провести экспериментальные исследования технологического процесса формообразования панелей с подкрепляющими рёбрами в последовательности РР-ДУФ для проверки достоверности разработанной методики расчёта.

8. Разработать специализированную установку с ЧПУ для формообразования и правки подкреплённых рёбрами деталей раскаткой роликами.

9. Подготовить технологические рекомендации по формообразованию продольно-оребрённых панелей комбинированным методом “раскатка роликами – дробеударное формообразование” на оборудовании с ЧПУ.

В диссертации приведены результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, посвященных изучению и математическому описанию внутренних связей в технологической последовательности РР-ДУФ, а также предложения по улучшению качества получаемых изделий, уменьшению трудоёмкости и повышению уровня автоматизации технологического процесса.

Научная новизна

1. Выявлена закономерность и предложен способ компенсации влияния технологической наследственности операции ДУФ на конечную форму детали путем управляемого воздействия на продольную компоненту кривизны, возникающую вследствие обработки дробью в процессе РР с расчётными режимами (п. 6 паспорта специальности 2.5.6).

2. Установлено, что метод расчета деформации детали после РР, основанный на моделировании процесса с приложением к детали эквивалентной растягивающей силы, применим при полном геометрическом подобии процессов обработки технологических образцов и реальных деталей (п. 3 паспорта специальности 2.5.6).

3. Установлено взаимовлияние соседних рёбер детали при их последовательной раскатке роликами и предложен способ членения детали при выполнении технологических расчётов на расчетные участки (РУ), представляющие собой ребро с прилегающими к нему участками полотна шириной, равной расстоянию между соседними рёбрами или расстоянию от ребра до края детали, и длиной, опре-

деляемой из условия обеспечения требуемых параметров точности формообразования при раскатке ребра РУ с неизменными режимами (п. 3 паспорта специальности 2.5.6).

4. Предложена расчётная модель, связывающая глубину внедрения роликов с регулировочными параметрами оборудования и позволяющая выполнить расчёт режимов РР панелей путём конечно-элементного моделирования процесса РР на образцах в виде РУ деталей взамен их опытной обработки (п. 3 паспорта специальности 2.5.6).

Теоретическая и практическая значимость работы

На основании теоретических и экспериментальных исследований разработан метод расчёта технологических параметров комбинированного процесса формообразования (РР–ДУФ) для монолитных панелей двойной кривизны с продольным оребрением. Применение предложенного метода в комплексе с автоматизированным оборудованием обеспечивает повышение точности и эффективности изготовления панелей сложной формы за счёт перехода от эмпирического подхода к расчётному. Практическими результатами работы является спроектированная, изготовленная и используемая в производственных условиях установка с ЧПУ для формообразования и правки подкреплённых деталей методом раскатки роликами, а также технологические рекомендации по реализации комбинированного метода обработки РР–ДУФ на оборудовании с ЧПУ.

Методология и методы исследования

Использовалась совокупность методов, которые применялись для получения результатов. Моделирование процессов РР рёбер панелей и ДУФ осуществлялось в среде нелинейного конечно-элементного анализа LSTC LS-Dyna Version R10. Обработка данных моделирования велась с использованием постпроцессора LS-Prepost, программы Microsoft Excel и языка программирования Python. Достоверность результатов подтверждена экспериментальным исследованием с помощью современных средств измерения: цифровых измерительных головок Mitutoyo Digimatic ID-S; исследовательского комплекса ИРНТУ на базе установки

УДИОН-2 для изучения остаточных напряжений механическим методом удаления слоев.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика определения исходных данных для расчёта технологических параметров процесса формообразования панелей раскаткой рёбер роликами, основанная на прогнозировании продольной компоненты двухосного изгиба от последующей дробеударной обработки с целью компенсации технологической наследственности.

2. Методика и результаты моделирования процесса формообразования расчетных участков монолитно-фрезерованных панелей сложной формы раскаткой рёбер роликами с использованием систем нелинейного конечно-элементного анализа для изучения закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния детали.

3. Расчётная модель и программное обеспечение для определения режимов раскатки роликами рёбер панелей с целью получения требуемой продольной кривизны, основанные на конечно-элементном моделировании процесса РР расчетных участков деталей.

4. Установка для формообразования и правки подкреплённых рёбрами деталей раскаткой роликами с ЧПУ.

5. Результаты экспериментального исследования технологического процесса формообразования панелей с подкрепляющими рёбрами в последовательности РР–ДУФ для проверки работоспособности разработанной методики расчёта.

6. Технологические рекомендации по формообразованию продольно оребрённых панелей комбинированным методом “раскатка роликами – дробеударное формообразование” на оборудовании с ЧПУ.

Достоверность результатов подтверждена экспериментальными исследованиями по реализации процесса раскатки роликами на образцах-пластинах и конструктивно подобных образцах (КПО) деталей типа панелей с рёбрами прямоуголь-

ного и Г-образного сечения. Операция РР выполнялась на установке для формообразования и правки (УФП-1) с ЧПУ, операция ДУФ – на дробемётной установке контактного типа УДФ-4 с ЧПУ.

Апробация работы

По теме диссертации в открытой печати опубликовано 11 научных работ, в том числе 6 статей – в ведущих научных рецензируемых изданиях, определенных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 1 статья – в международных изданиях, включенных в Web of Science. Получены патент на полезную модель, и три свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста; состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка насчитывающего 110 источников и трёх приложений; содержит 24 таблицы и 104 рисунка.

Диссертация подготовлена на кафедре технологии и оборудования машиностроительных производств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Иркутский национальный исследовательский технический университет”.

1 Конструктивно-технологические особенности деталей типа монолитно-фрезерованных панелей

1.1 Конструктивные особенности деталей

Стремление разработчиков изделий самолёто-, ракето- и судостроения увеличить прочность и жесткость, уменьшить массу, повысить герметичность конструкций привело к разработке и внедрению монолитнофрезерованных панелей [26]. Панель представляет собой конструкцию, в которой обшивка и подкрепляющие ее ребра жесткости выполнены в едином исполнении (рисунок 1.1).

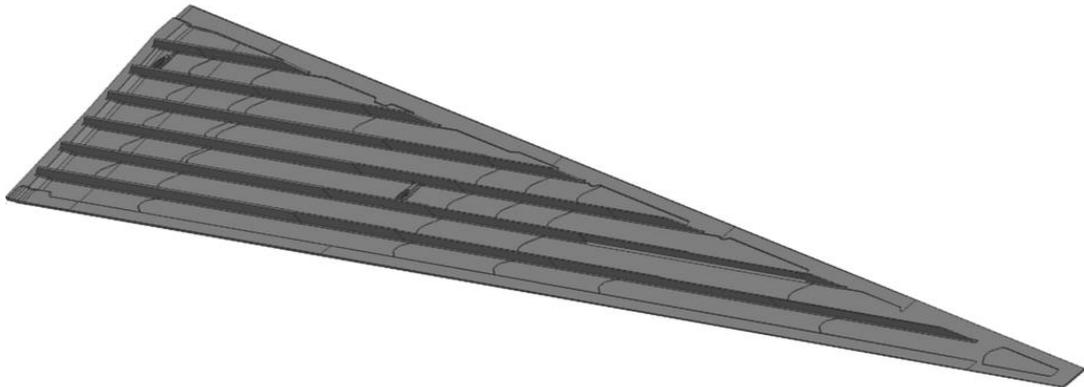


Рисунок 1.1 – Монолитно-фрезерованная панель крыла самолёта

Панели условно подразделяются на два класса: с направлением рёбер в одном направлении, и “вафельные” – с оребрением в двух направлениях. Длина панелей может достигать 30 м и более. Ребра панелей имеют различную конструктивную форму: прямоугольную, Г-, Т- и I-образную (рисунок 1.2).

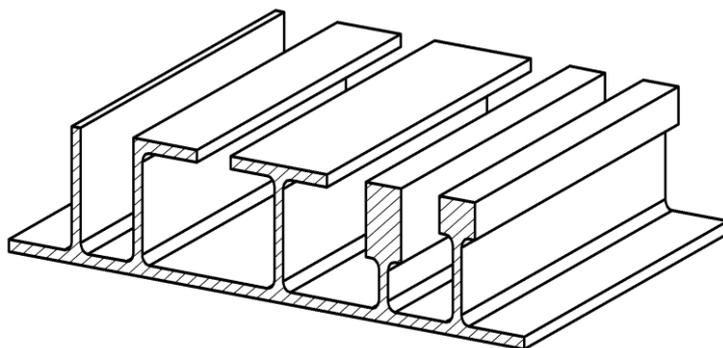


Рисунок 1.2 – Типовые конструктивные исполнения рёбер монолитных панелей

Пространственная форма панелей представляет собой сочетание линейчатых поверхностей и участков со знакопеременной двойной кривизной – зон перегиба (рисунок 1.3). Распределение радиусов кривизны сечений типовой панели крыла самолёта приведено на рисунке 1.4.

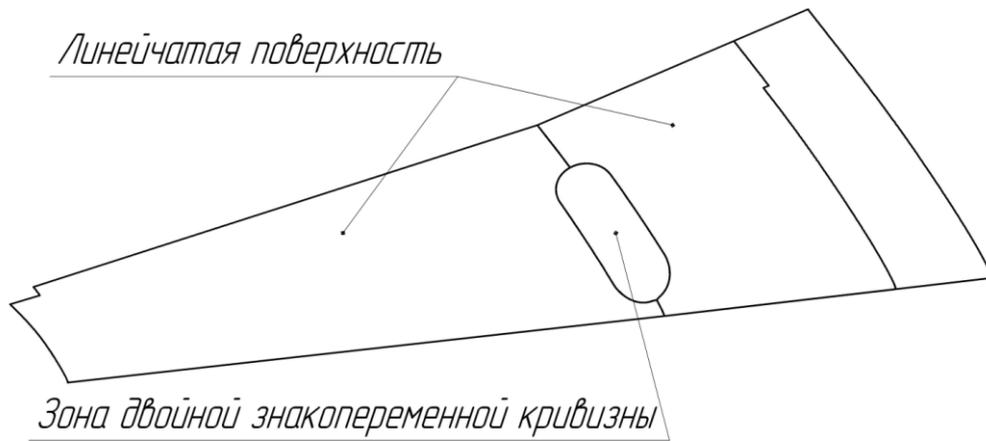


Рисунок 1.3 – Типовая форма крыла самолета

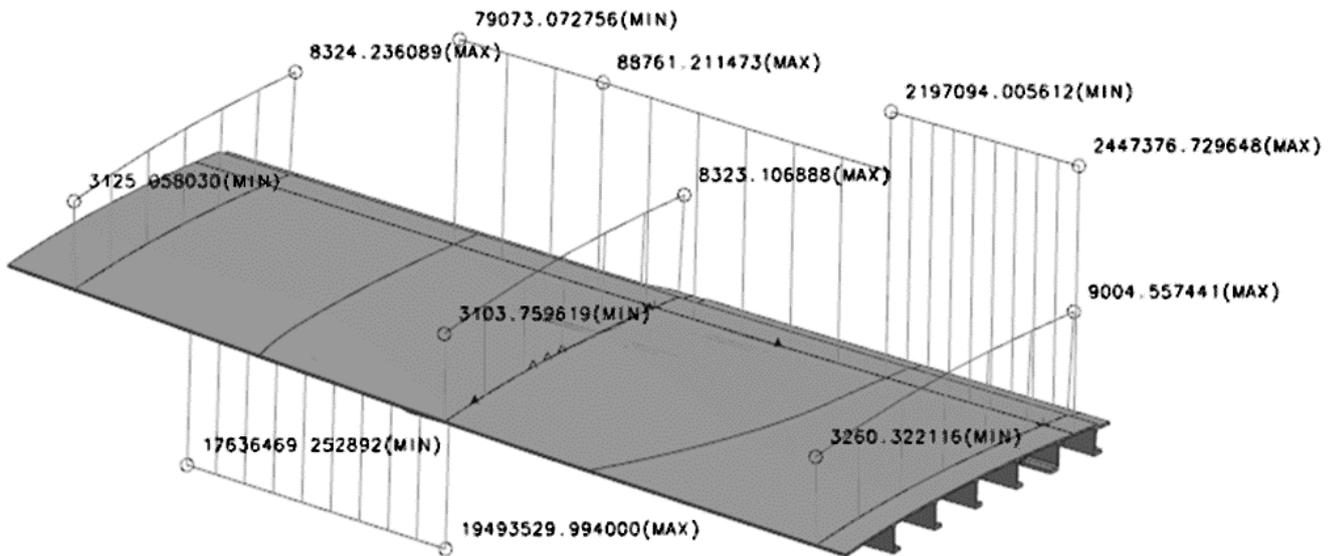


Рисунок 1.4 – Распределение радиусов продольной и поперечной кривизны панели самолёта в области перегиба (мм)

Допустимые отклонения контура деталей от теоретического находятся в пределах 0,1 – 1,0 мм [68]. Разработка конструкции крупногабаритных панелей осуществляется с учетом существующих технологий изготовления и формообразования.

1.2 Существующие технологии формообразования крупногабаритных панелей

Заготовками монолитно-фрезерованных панелей являются плиты, получаемые с помощью прокатки. Материалами служат высокопрочные деформируемые алюминиевые сплавы в закаленном и искусственно состаренном состоянии. Для данных материалов характерна повышенная чувствительность к повторным нагрузкам и концентрации напряжений. Это обуславливает требования к конструкции изделий; например, при изменении сечений необходимы большая плавность переходов, малые перепады жесткости и т.д.

В процессе изготовления панелей фрезерованием подбор режимов резания осуществляют с учетом требуемых значений шероховатости поверхности и максимально допустимой температуры нагрева материала в зоне резания [41, 50].

После фрезерования в большинстве случаев возникает коробление детали, связанное с перераспределением термических остаточных напряжений и пластической деформацией поверхностных слоёв вследствие воздействия режущего инструмента. Известны методы минимизации коробления фрезерованных панелей, основанные на учёте их конструктивных особенностей, закономерностей распределения остаточных напряжений, анизотропии механических свойств материала, а также на назначении оптимальных режимов и стратегий обработки [31, 35, 36, 51].

Заготовкам панелей придают заданную пространственную форму на операции формообразования. Данная операция, называемая формообразованием, является одной из самых сложных и трудоёмких. Это обусловлено большими габаритными размерами деталей и малой кривизной поверхности, что вызывает трудности при формировании остаточных деформаций, соизмеримых с упругими деформациями.

Традиционным способом формообразования панелей является гибка в передвижку на гидравлических прессах. Однако операция имеет такие недостатки, как отсутствие стабильности процесса, большая трудоемкость и высокие требования к

квалификации рабочих. Кроме того, прессовая гибка, как правило, отличается низкой точностью получаемой формы деталей и наличием дефекта под названием “огранка” [90]. Нередко при формировании поперечной кривизны детали возникает нежелательная деформация (искривление в продольном направлении, крутка сечений). После гибки для повышения точности формы деталей применяют обдвку дробью на ручных дробеструйных машинах.

На сегодняшний день одним из эффективных способов формообразования крупногабаритных панелей является комбинированная технология, позволяющая получать различную кривизну поверхности: одинарную, двойную и знакопеременную (рисунок 1.5).

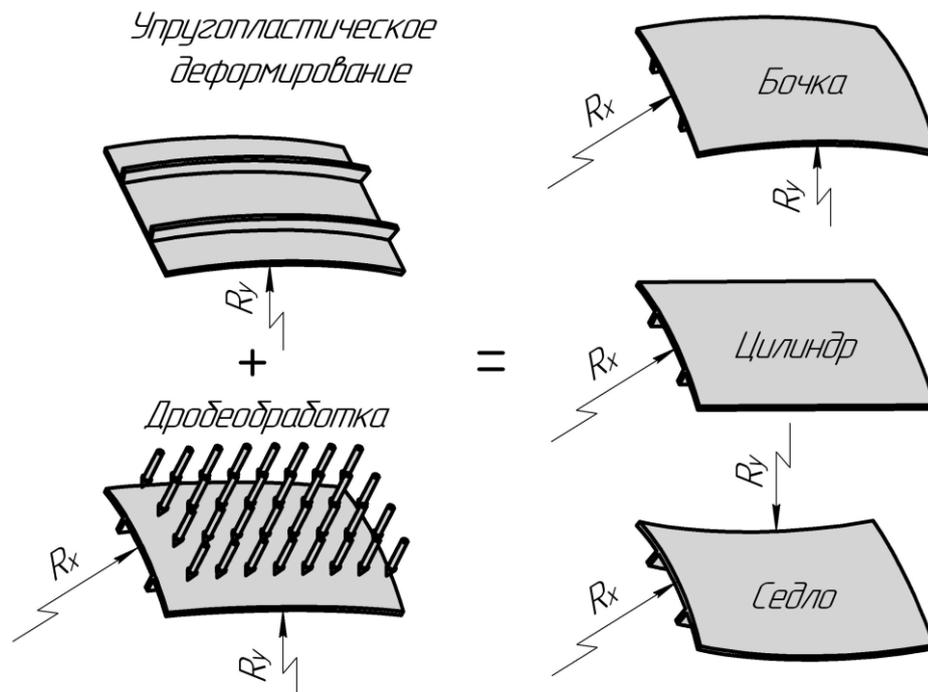


Рисунок 1.5 – Схема комбинированного способа формообразования панелей [68]

Требуемая форма деталей достигается суперпозицией двухосного изгиба, создаваемого обработкой дробью, и одноосного изгиба, реализуемого различными методами упругопластического деформирования в зависимости от конструкции детали. Главным преимуществом комбинированного способа формообразования является разделение процесса на простые, легкие в управлении и контролируемые операции. Впервые этот способ был осуществлен в опытном производстве панелей кессона

крыла самолетов ТУ-204 и ТУ-334 [29, 77]. Рассмотрим применяемые операции, их особенности и оборудование, на котором они выполняются.

При ДУФ дробь, внедряясь в обрабатываемую поверхность, вызывает всестороннюю деформацию поверхностных слоев и их удлинение, что приводит к возникновению двухосного изгиба. Основными технологическими преимуществами метода ДУФ являются распределенный характер нагружения, возможность регулирования интенсивности воздействия, полное отсутствие эффекта упругого восстановления формы. Этим обусловлено достижение высокой точности формообразования наряду с увеличением производительности процесса и реализацией эффекта упрочнения, повышающего усталостную прочность и долговечность деталей [2, 3, 25]. Из-за особенности конструкции панелей (наличием оконных участков, стыковочных элементов, усилением люков) ДУФ применяют в сочетании с прессовой гибкой.

Родиной технологии ДУФ является Германия. По окончании Второй мировой войны технология была вывезена в США, засекречена и запатентована [97]. Количество публикаций на эту тему ограничено. В основном описываются два способа ДУФ: обработка с заневоливанием, то есть обработка поверхности в предварительно упругоизогнутом состоянии [107], и двухсторонняя дробеобработка детали [97] (рисунок 1.6).

Разработкой технологии и оборудования в области дробеударного формообразования занимающиеся иностранные фирмы: “Metal Improvement Company” (MIC), США; “Wheelabrator”, США; “Abrasive Finishing Company” (AFCO), США; “Vought”, США; “Rosler”, Германия; “Kugelstrahlzentrum Aachen” (KSA), Германия; “Sisson Lehmann”, Франция; “Sonaca Group”, Канада; “Aerosphere Inc.”, Канада и др. Пример оборудования для ДУФ показан на рисунке 1.7.

В [110] описана технология формообразования панелей, применяемая фирмой “Boeing Commercial Airplane Co”, США. Метод заключается в двухсторонней дробеобработке на двух установках фирмы “Wheelabrator”. Габаритные размеры панели, которые возможно обработать: 36 000×3 700 мм. Первая установка формирует продольную кривизну с помощью двухсторонней обработки кромок дробью,

вторая обрабатывает дробью наружную поверхность панели. Затем панели подвергаются зачистке для придания обработанным дробью поверхностям требуемой шероховатости. После проведения всех операций выполняется упрочнение дробью мелких фракций. Комплекс оснащен устройством числового программного управления на базе ЭВМ, в которой хранится база данных с режимами обработки.

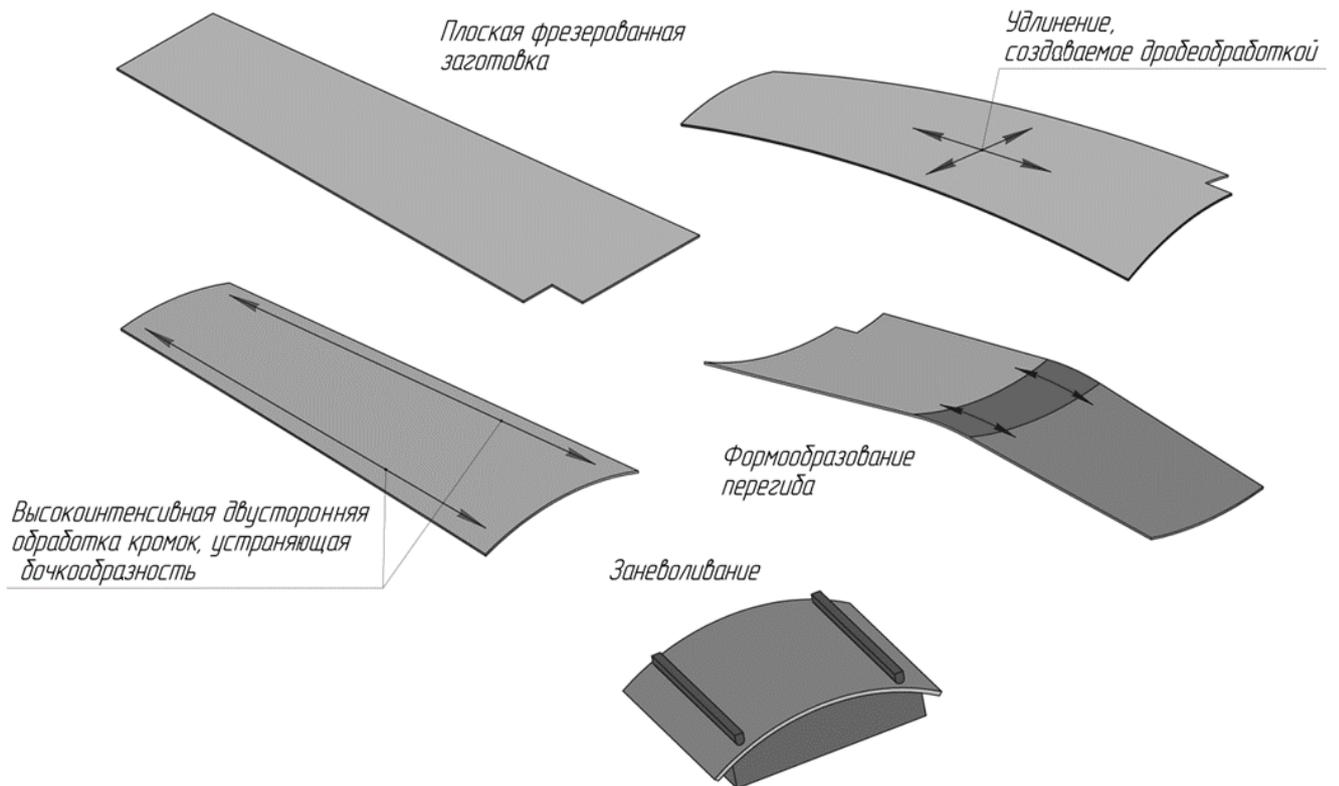


Рисунок 1.6 – Схемы формообразования длинномерных панелей и обшивок, применяемые за рубежом



Рисунок 1.7 – Установка фирмы “Metal Improvement Company”

По каждому режиму имеются значения деформаций изгиба и удлинения, полученные на специальных образцах, имитирующих реальные детали. Подбор режимов обработки выполняется с учетом предварительно измеренных значений кривизны детали и дальнейшего сравнения с эталонными значениями, хранящимися в базе данных комплекса.

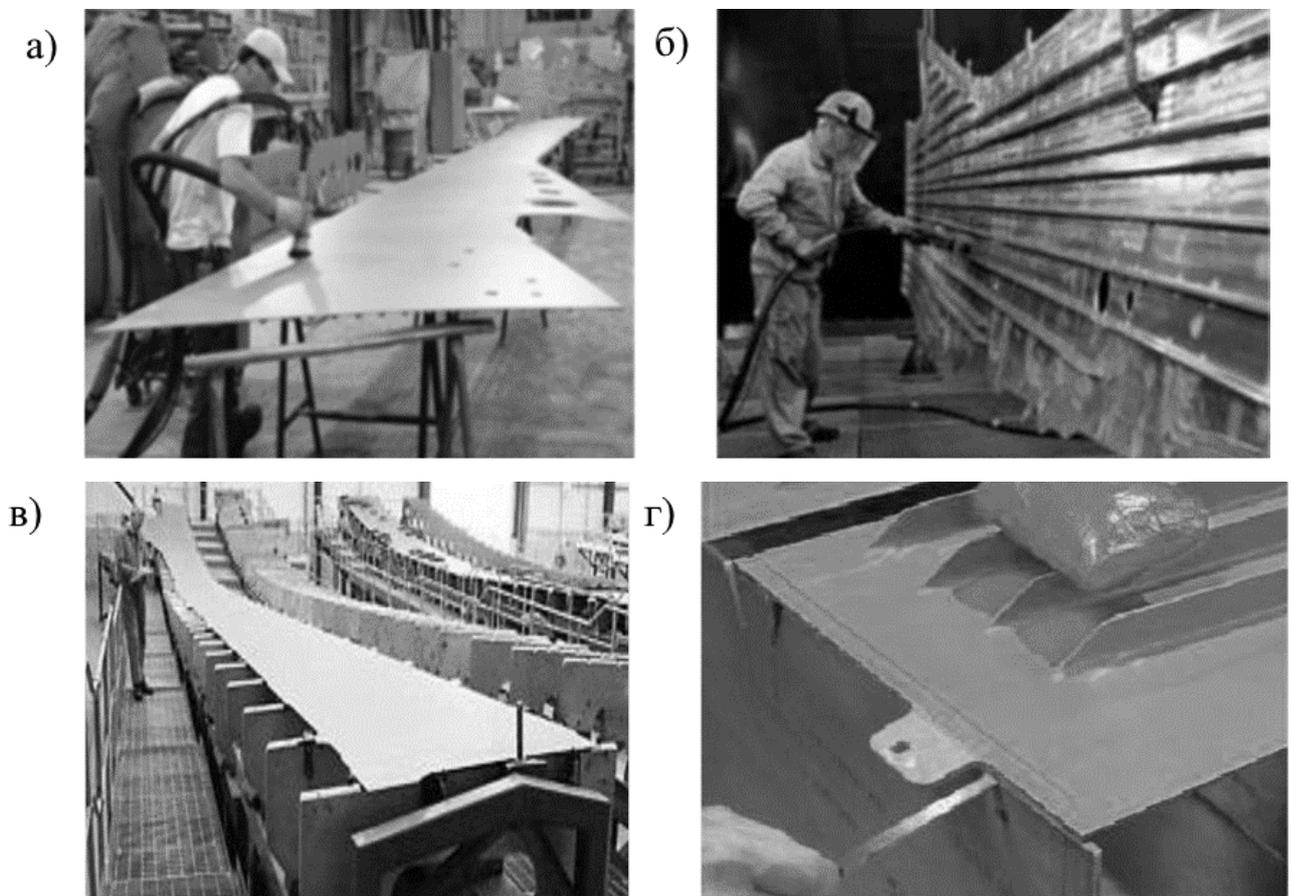
Фирмой “Wheelabrator” также изготовлена установка MP 20 000 (рисунок 1.8). На данной установке реализованы операции формообразования и упрочнения с помощью двух роботов, оснащенных тремя воздушными соплами. Установка имеет возможность обрабатывать детали тремя фракциями дроби [58]. Особенностью зарубежного оборудования является осуществление операций в закрытых камерах, что не позволяет выполнять оперативный контроль формы без перемещения деталей в специальное измерительное приспособление.



Рисунок 1.8 – Установка для дробеударного формообразования и упрочнения MP 20 000 фирмы “Wheelabrator group”

Описанные технически сложные комплексы оборудования решают проблему механизации предварительного формообразования. Операции окончательной доводки выполняются с помощью ручного оборудования (рисунок 1.9) и контрольной оснастки. В процессе контроля формы детали разрешается приложение нагрузки до 45,36 кг на деталь [110].

После ДУФ параметры шероховатости обработанной поверхности детали в ряде случаев выходят за установленные пределы, поэтому обработанную поверхность зачищают абразивными инструментами (шлифовальные ленты, лепестковые круги, полимерно-абразивные щетки и полировальные круги из объемного абразивного материала) [14, 37]. Автоматизированная зачистка применяется при производстве панелей крыла самолета Galaxy [110], однако описание применяемого оборудования в указанной публикации не приводится. Компанией “Boeing” запатентована четырехосевая автоматизированная установка [63], осуществляющая обработку лепестковыми кругами.



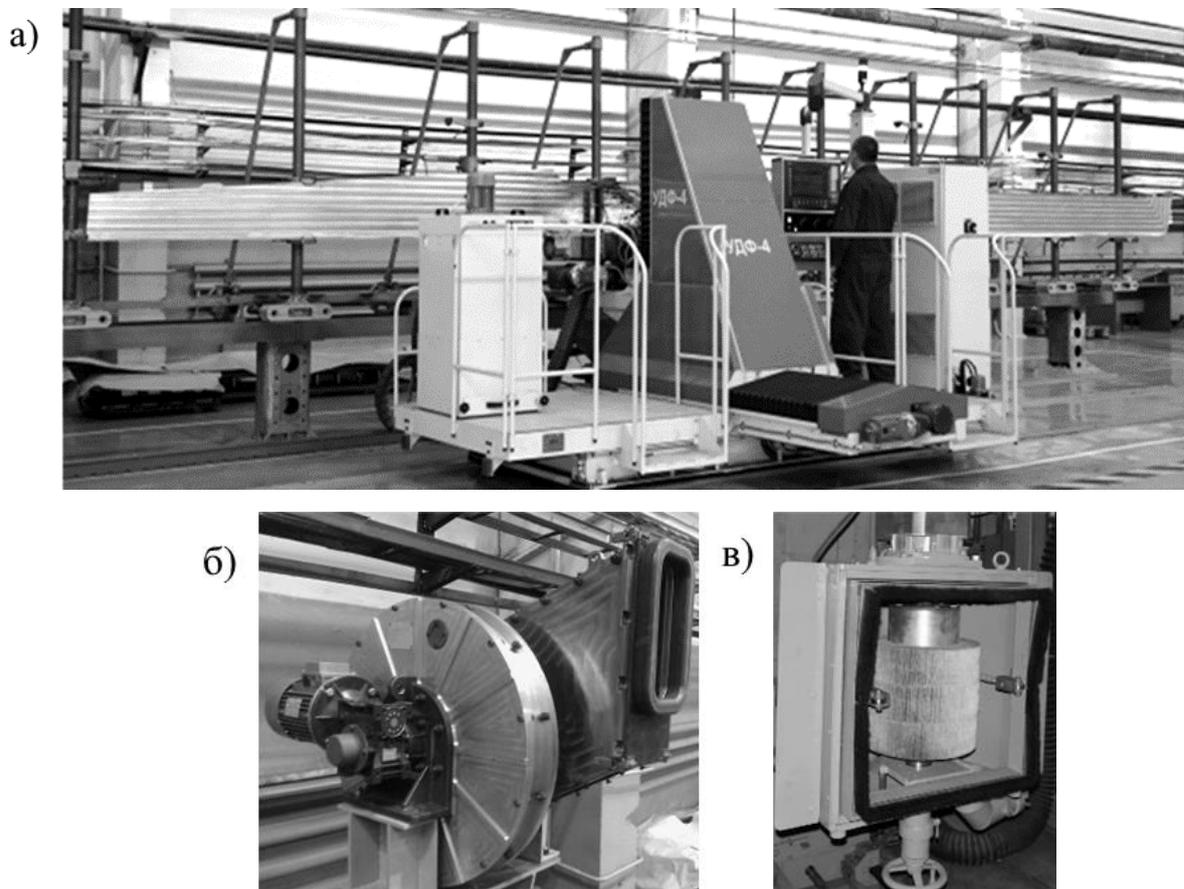
а – сайта компании “Sonaca Group”; б, в – сайта компании “Wheelabrator”;

г – оснастка для контроля контура панелей

Рисунок 1.9 – Доводка контура панелей

В отечественном авиастроении для ДУФ с последующей зачисткой используется специализированная установка дробеударного формообразования (УДФ) с

ЧПУ, которая перемещается вдоль детали, закреплённой в продольном теоретическом контуре [69]. На установке имеются сменные рабочие органы – дробемётный аппарат и зачистная головка (рисунок 1.10). Завершающей операцией процесса изготовления панелей является дробеметное упрочнение [11, 72, 85], используемое для повышения ресурса, сопротивления усталости и коррозионной стойкости панели. После окончания данной обработки правка деталей упругопластическим деформированием запрещена, из-за возможности потери упрочняющего эффекта [8, 73].



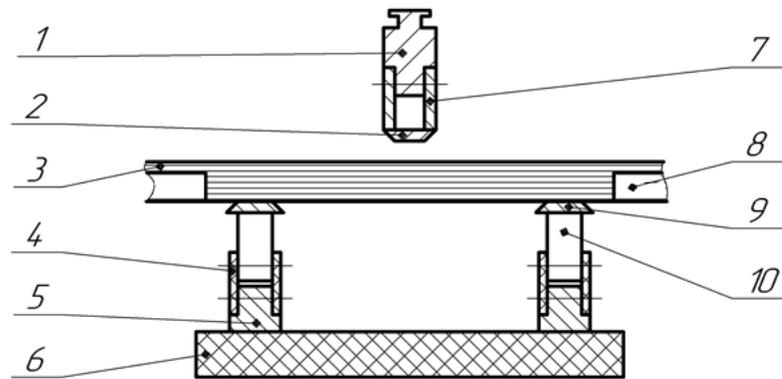
а – УДФ-4; б – дробеметный аппарат ЗД400М; в – зачистная головка ЗГ-2

Рисунок 1.10 – Установка для ДУФ, используемая в отечественном авиастроении [69]

В комбинированных технологических процессах (см. рисунок 1.5) упругопластическое деформирование панелей перед операцией ДУФ возможно выполнять разными способами: свободной гибкой на гидравлических прессах, посадкой

или разводкой полок и рёбер в специальных штампах, гибкой-прокаткой на валковых листогибочных машинах и раскаткой рёбер роликами.

Процесс формообразования зоны перегиба вследствие длительности и трудоёмкости является “узким” местом в производстве, что подтверждается многими информационными источниками. Впервые в отечественной практике эта задача была решена при создании самолета Як-42. Формообразование локального перегиба на универсальных прессах выполнялось с использованием сопряженного штампа для обшивок и на рессорном штампе свободной гибки – для панелей с ребрами [94] (рисунок 1.11) большим числом нагружений с постепенной доводкой геометрии панели до требуемой.



1–пуансон; 2, 9–гибкий брус; 3–рессора; 4, 7–щека; 5–корпус опоры; 6–плита; 8–заготовка;
10–эксцентрик

Рисунок 1.11 – Схема рессорного штампа

Рессорный штамп содержит матрицу из двух опор и пуансон. Расстояние между опорами регулируется. В зоне изгиба панели между ребрами и вдоль кромок размещены рессорные вкладыши, равные высоте рёбер панели, выполненных из листов толщиной 1,5-2 мм. Рабочая поверхность пуансона и опор закруглена радиусом 50 мм. Пуансон может перемещаться относительно опор и имеет возможность перекося по длине для создания различных угловгиба.

Технология свободной гибки реализована на прессах типа ПП-250 для формообразования обшивок одинарной кривизны длиной до 25 м (только для определенного перечня деталей), правки заготовок, подгибки мест усиления перед ДУФ [6, 7]. Известны образцы зарубежного прессового оборудования, предназначенного

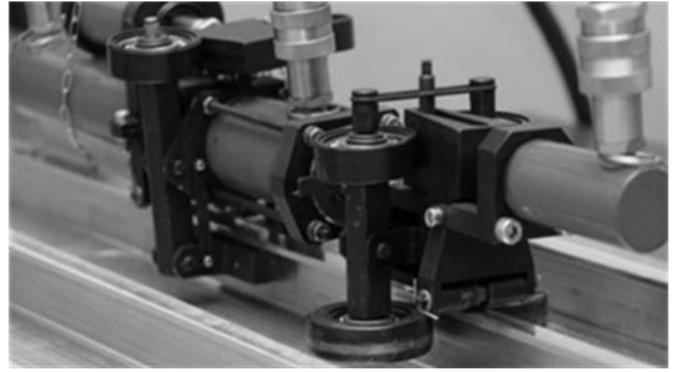
для последовательного формообразования панелей в программном режиме (фирмы “Verson-LCM”, “Hammerly”, “Sheridan-Grey” и т.д.) [6, 7].

Преимущество прессового метода заключается в его универсальности. Для участков монолитных панелей (например, стык крыла и центроплана с толщиной 30 мм и более) это единственно возможный метод. Недостатком является отсутствие стабильности, большая трудоемкость, низкая точность, дефект формы “огранка” и потребность в высокой квалификации персонала [90].

Листовые детали обшивки цилиндрической и конической формы получают методом гибки-прокатки на валковых листогибочных машинах. Для деталей с переменной толщиной, ребристых и вафельных панелей применяются различные технологические накладки, вкладыши и заполнители. Процесс отличается более высокой производительностью и точностью при достаточной стабильности. Недостатком является возможность обработки деталей длиной не более 12 м, что обусловлено ограничением рабочего пространства существующего оборудования [6, 15, 17, 18, 52].

В связи с существенными технологическими трудностями при гибке крупногабаритных подкрепленных деталей на прессовом и валковом оборудовании распространение получили методы, связанные с локальным пластическим деформированием: раскатка роликами, посадка и разводка рёбер панели.

Раскатка роликами представляет собой процесс упругопластического деформирования подкрепляющих рёбер деталей двумя вращающимися роликам, вдавливаемыми в ребро, что приводит к удлинению обработанного участка и его изгибу. Опытный образец оборудования для реализации данного метода, изготовленный ИРНТУ для Иркутского авиационного завода, показан на рисунке 1.12. Раскатка роликами также является эффективным способом правки деталей каркаса, подверженных короблению после фрезерования. На рисунке 1.13 приведена схема устранения двухосного изгиба деталей типа балок из [48, 59]. Правка маложестких подкреплённых деталей реализуется при помощи ручных раскатных устройств, в которых давление роликов на обрабатываемые конструктивные элементы создаётся путём затяжки силового болта динамометрическим ключом (рисунок 1.14).



а)

б)

а – установка УМПД-2; б – рабочий орган установки УМПД-2

Рисунок 1.12 – Установка для раскатывания рёбер

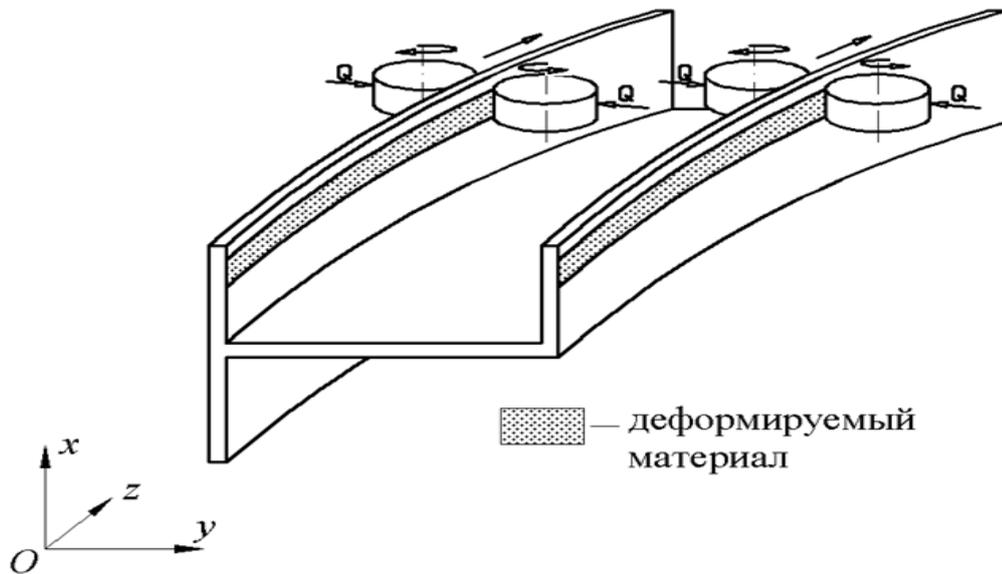


Рисунок 1.13 – Схема процесса правки двухосного изгиба деталей типа балок

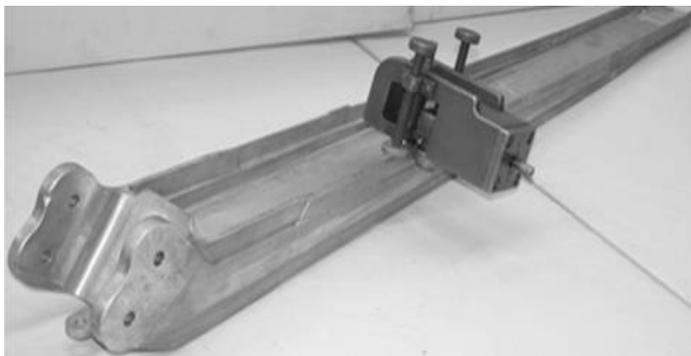


Рисунок 1.14 – Инструмент для формообразования и правки мало жестких подкреплённых деталей методом раскатки роликами [48]

Фирма “Eskold AG” (Швейцария) разработала оборудование для формообразования оребрѐнных панелей, в котором задание кривизны осуществляется наклонном рѐбер друг к другу [60, 61] (рисунок 1.15). Оборудование ориентировано на правку и доводку формы деталей после основных методов формообразования и используются только в ручном режиме управления.

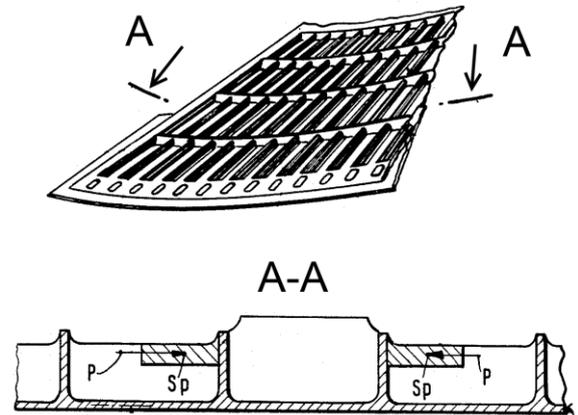


Рисунок 1.15 – Обработка панели самолета AG Dornier Do 228 инструментом фирмы “Eskold AG” и принцип его работы [55]

В зарубежной практике применяется способ формообразования в продольном направлении с помощью двухсторонней обработки рѐбер и кромок полотна панели дробью (рисунок 1.16). Данная методика в США и европейских странах защищена патентами [64, 65]. Способ характеризуется несколькими регулируемыми технологическими параметрами, что позволяет достигать требуемых результатов различными методами.

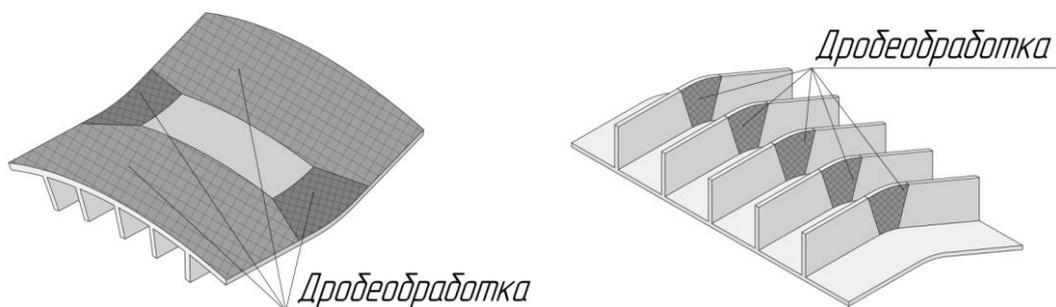


Рисунок 1.16 – Схема обработки дробью рѐбер и полотна при формообразовании панелей [64]

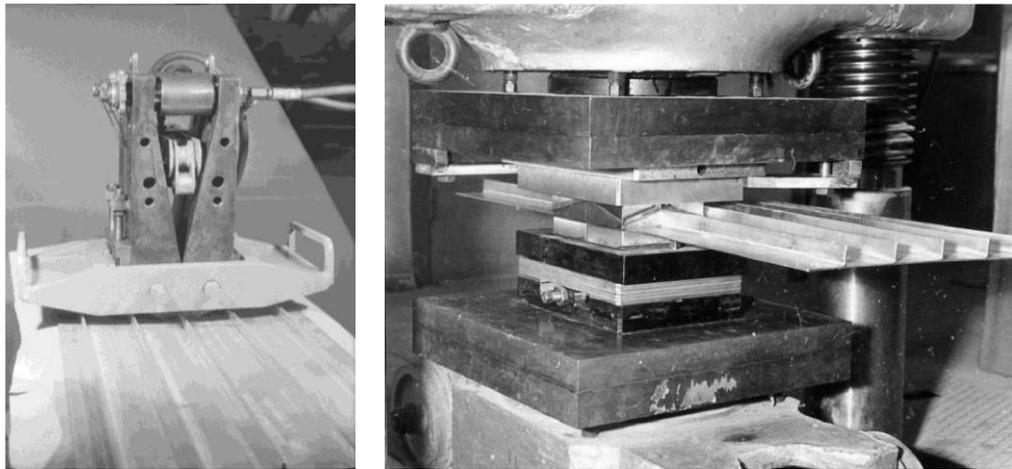
Реализация процесса обработки дробью рѐбер, приваренных к полотну обшивки фюзеляжа самолета Airbus A380, выполнена компанией KSA (Германия),

которой разработана технология автоматизированной дробеструйной обработки сварных панелей с использованием роботизированной дробеструйной установки [100]. Данная технология внедрена в производство в 2003 г. на заводе Airbus в городе Норденхам (Германия). Установка позволяет обрабатывать оребренные панели самолёта Airbus A380 размерами до 11 000x3 100 мм (рисунок 1.17). Генерация управляющих программ выполняется на основе электронных моделей деталей (ЭМД) и результатов сканирования заготовок перед обработкой. Установка снабжена трехмерной вакуумной оснасткой для фиксации детали в теоретическом контуре. Недостатками дробеударного способа обработки рёбер панелей являются сложность и громоздкость оборудования, а также трудности в настройке и отладке.



Рисунок 1.17 – Оборудование для дробеструйной обработки рёбер фирмы KSA [56]

В [80, 82, 109] описаны опытные образцы устройств для локального нагружения участков полотна с ребрами (рисунок 1.18). В данных устройствах осевое усилие действует на участке полотна и в сечении ребра, а изгибающий момент – в плоскости ребра. Для панелей с прямоугольным ребром используется специальное устройство, которое возможно применять при комплектовании или сборке монолитной конструкции в сборочном стапеле. Устройство закрепляется на ребре панели с базой 160 мм и осуществляет его деформирование (см. рисунок 1.18, а). Для совместной обработки полотна и ребра панели методом посадки и разводки с изгибом в обе стороны используется специальный штамп (см. рисунок 1.18, б).



а)

б)

а – устройство для обработки рёбер; б – устройства для обработки полотна и рёбер

Рисунок 1.18 – Опытные образцы устройств для локального нагружения участков полотна с ребрами [82]

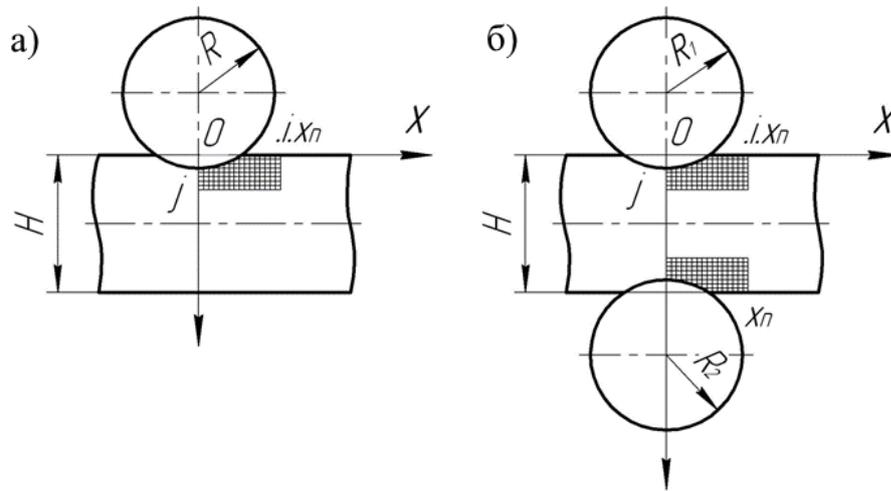
Недостатками описанных устройств являются ограниченные технологические возможности (обработка рёбер только с прямоугольным сечением), наличие больших необработанных зон, ограничение в размерах обрабатываемых деталей.

1.3 Теоретические и экспериментальные исследования технологического процесса формообразования панелей

Рассмотрим существующие методики расчета технологических параметров формообразования панелей с продольным оребрением. Многие публикации освещают исследования и решения прикладных задач по упругому и упругопластическому изгибу оболочек. Это классические работы по теории обработки металлов давлением [15, 86], упругому и пластическому изгибу [4, 87, 88], а также исследования по механике пластических деформаций [89].

В.А. Захаровым [32] предложена математическая модель формоизменения при переходе от единичного внедрения индентора к равномерной односторонней и двухсторонней обработке поверхности детали методами поверхностного пластиче-

ского деформирования (дробеударной обработкой, раскаткой шариками и роликами). В работе задействованы общие подходы, используемые при численных методах решения контактных задач применительно к жестким инденторам в виде поверхностей вращения и упругопластическому материалу. Напряженно-деформированное состояние в зоне контакта определяется путем исследования векторного поля смещений точек тела при внедрении. Так как задача осесимметричная, то при ее постановке рассматриваются две расчетные схемы обработки: односторонняя и двухсторонняя (рисунок 1.19).



а – односторонняя; б – двухсторонняя

Рисунок 1.19 – Расчетные схемы обработки [32]

Решение задачи реализовано на ЭВМ, что позволило в узлах сетки для различного типа инденторов определить напряжения, усилие вдавливания, зону упрочнения. При решении контактной задачи рассчитываются параметры процесса формообразования типовых профильных деталей. В своей работе В.А. Захаров приводит также уравнение прогибов с учетом решения контактной задачи для цилиндрического индентора. Однако указанные исследования не позволяют выполнить анализ эпюр действующих и остаточных напряжений после раскатки роликами.

В.Г. Кононенко, В.Т. Сикульский [38, 39, 81] приводят методику расчета требуемой кривизны панели через обжатие ребер (рисунок 1.20). Особенностью метода является расчет кривизны нейтральной поверхности участка II через обжатие краевой зоны ребра. Расчет ведется следующим образом. Определяется кривизна

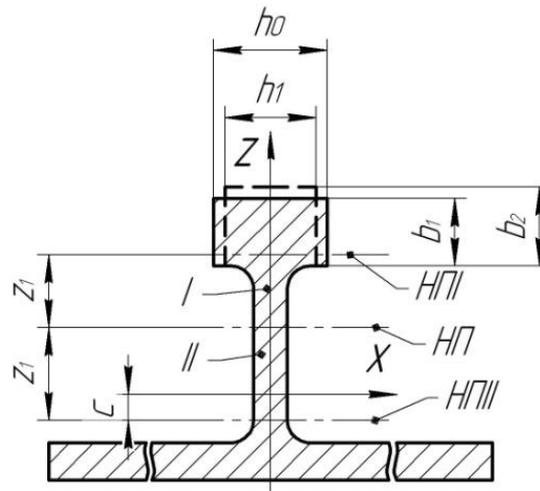


Рисунок 1.20 – Расчетная схема для определения остаточной кривизны при обжатии ребра [38]

нейтрального слоя панели и методом подбора решается система уравнений по нахождению относительного обжатия. Такая методика расчёта обеспечивает удовлетворительные результаты при обжатии рёбер до 5% и относительных радиусах кривизны от 10%. Это подтверждено экспериментальными исследованиями образцов панелей из материала Д16Т с рёбрами высотой 50 мм и толщиной 5 мм. Обжатие рёбер может происходить в любой последовательности при выполнении условий:

- при переходах от ребра к ребру полотно панели деформируется в пределах упругости;
- влияние на очаг деформации смежных рёбер и прилегающих участков полотна должно быть существенным.

Схема процесса раскатки рёбер показана на рисунке 1.21.

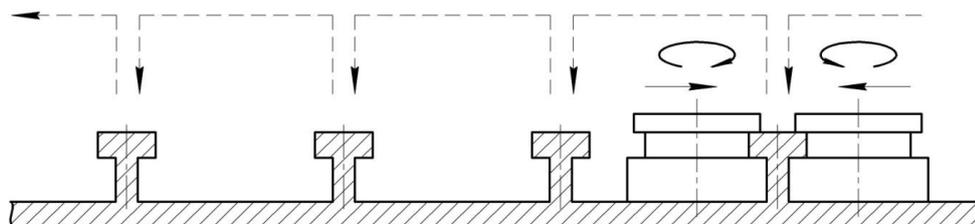


Рисунок 1.21 – Схема процесса раскатки рёбер [39]

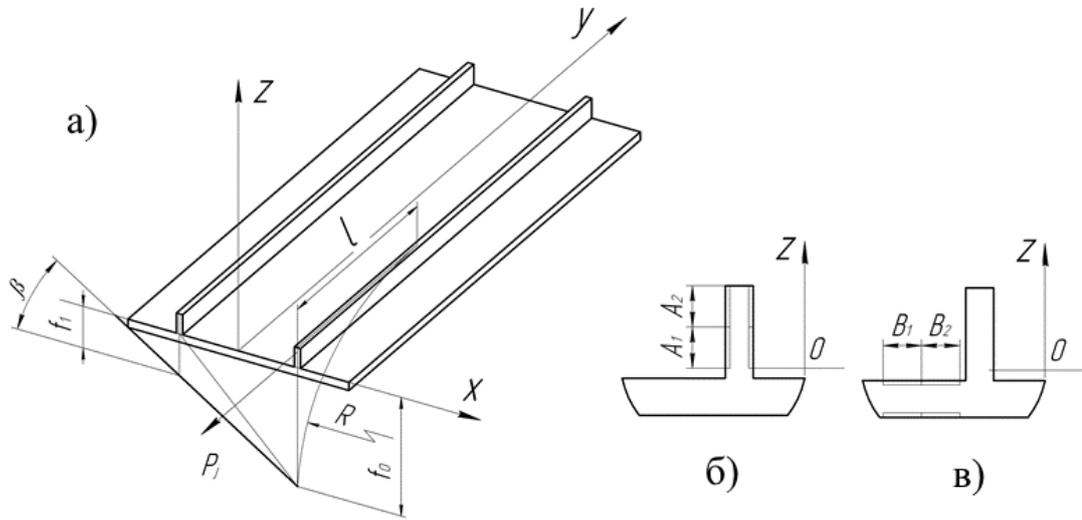
Для критерия оценки точности была принята относительная разность прогибов крайних рёбер (до 0,03 мм), находящихся в противоположных условиях деформирования. Взаимное расположение зон локальных воздействий на ребрах панели позволяет получить её необходимую форму – прямой и косою изгиб с различными углами к оси рёбер. Точность угла гибки в 1° достигается за счет одного корректировочного замера.

Как видно из расчетных схем (см. рисунок 1.20), применение данной методики ограничивается симметричным профилем ребра панели. Схема обработки (см. рисунок 1.21) накладывает ограничение на конструкцию деталей. Обрабатываемая полка ребра должна быть жесткой во избежание потери устойчивости в процессе обжата роликами. Для выполнения практических расчётов необходима разработка специального программного обеспечения.

К.Н. Скосоренко в [83] установил закономерность между параметрами процессов РР и ДУФ в комбинированном методе формообразования ребристых панелей. При расчете режимов РР рёбер панели учитывается изменение кривизны в поперечном и продольном направлениях после дробеударной обработки. При локальной обработке участков профильной детали линии действия внешних сил не совпадают с главными осями инерции сечения. Это вызывает общий разворот поперечного сечения детали на некоторый угол относительно конструктивной оси как следствие косою изгиба (рисунок 1.22). Разворот поперечного сечения может быть и следствием неравномерного изгиба продольных рёбер панели в вертикальной плоскости при их раскатке или двухсторонней дробеударной обработке. Прогиб концевого участка панели при раскатке ребра сопровождается поворотом поперечного сечения.

Приведённая методика определяет технологические параметры процесса формообразования панелей для получения требуемого разворота поперечного сечения как результата косою изгиба. Недостатками данной методики расчета являются высокая сложность и трудоёмкость с наличием большого количества эмпирических коэффициентов. При этом не рассматриваются случаи обработки рёбер с

разными усилиями, что не полностью охватывает спектр технологических возможностей процесса РР.



а – разворот сечений при раскатке ребра; б – обработка продольного ребра детали;
в – двухсторонняя обработка боковых участков полотна

Рисунок 1.22 – Расчетные схемы обработки профильной детали [83]

В работах [68, 105] приведена зависимость между компонентами кривизны длинномерных листовых деталей, подвергаемых формообразованию комбинированным методом, заключающемся в раздельном получении кривизны в продольном и поперечном направлениях:

$$k_y^{mp} = k_y^{\partial y \phi} + k_y^{y \phi n}, \quad (1.1)$$

где k_y^{mp} – требуемое значение продольной кривизны образуемого участка детали ($k = 1/R$, R – радиус кривизны);

$k_y^{\partial y \phi}$ – продольная кривизна, образующаяся при ДУФ, выполняемом с целью получения требуемой поперечной кривизны k_x^{mp} ;

$k_y^{y \phi n}$ – продольная кривизна, образующаяся при упругопластическом формообразовании детали. В качестве правила знаков в данном выражении принято, что положительной является поперечная кривизна.

Согласно работе [92] на окончательную форму детали, подвергнутой ДУФ, оказывает влияние операция зачистки абразивными лепестковыми кругами, выполняемая в случае ухудшения шероховатости поверхности. Результирующая кривизна технологического сочетания ДУФ-зачистка с учетом принципа суперпозиций определяется выражением

$$k = k^{\text{ДУФ}} \pm \Delta k^{\text{зач}},$$

где $\Delta k^{\text{зач}}$ – изменение кривизны после зачистки детали, знак которого зависит от степени покрытия S при ДУФ ($S < 40\%$ – отрицательный, $S > 40\%$ – положительный).

Определение кривизны деталей, подвергаемых поверхностной обработке, в работе [68] осуществляется путём определения силовых факторов – внутренних сил, действующих на деталь на расстоянии z_c до центра тяжести сечения, что приводит к возникновению изгибающего момента, который связан с кривизной детали зависимостью

$$\kappa_i = \frac{12M_i}{EK_{\text{упр}}H_{\text{пр}j}^3}; \quad i, j = x, y, \quad (1.2)$$

где E – модуль упругости 1-го рода;

$K_{\text{упр}}$ – коэффициент вида НДС, характеризующий отличие зависимости между компонентами напряжений и деформаций в рассматриваемом направлении при сложном НДС от зависимости, отвечающей одноосному НДС в области упругих деформаций;

$H_{\text{пр}}$ – приведенная толщина детали, эквивалентная моменту инерции комплексного сечения криволинейной формы;

M_i – изгибающий момент.

Для определения распределенной внутренней силы $P^{\text{вн}}$, действующей на деталь со стороны раскатанного ребра (рисунок 1.23), автор [10] использует эмпирический метод, предусматривающий изготовление КПО детали, раскатку рёбер КПО с заданной силой сжатия роликов, определение кривизны образца и вычисление действующего на него изгибающего момента $M_{\text{рас.}}$, по формуле (1.2).

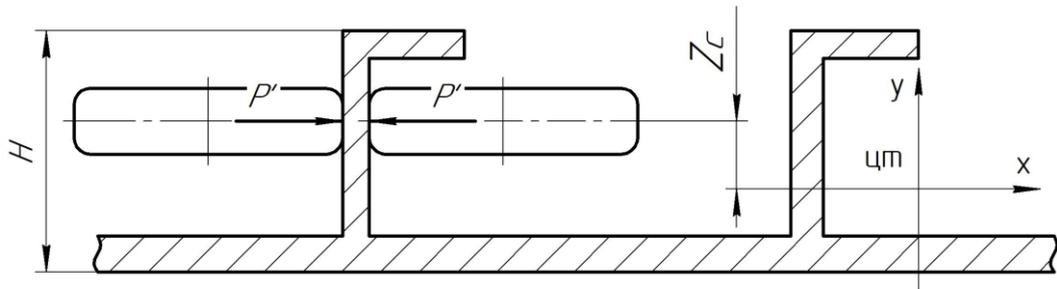


Рисунок 1.23 – Схема нагружения ребра при раскатке роликами [10]

Сила $P^{вн}$ определяется по следующей формуле, как:

$$P^{вн} = \frac{M_{рас}}{n_p z_c}, \quad (1.3)$$

где n_p – количество рёбер в расчётном сечении;

z_c – расстояние от середины ширины роликов до центра тяжести сечения.

Данная методика позволяет при помощи РР рёбер получить только одноосный изгиб панели с условием, что все её ребра имеют одинаковую кривизну. Точность расчета технологических параметров обеспечивается только в условиях минимальной разности сопротивления изгибу в продольном и поперечном направлениях. Реальные панели имеют подкрепления толщиной более 8 мм и утонения до 3 мм, что обуславливает значительную разницу продольной и поперечной жесткости. Точность методики расчета может быть обеспечена только при изготовлении образцов на каждый расчётный участок панели. Данный подход является трудоёмким и дорогостоящим.

А.А. Макарук в [49] рассматривает расчет прогиба и угла закручивания детали типа балки при действии растягивающих сил, вызванных раскаткой роликами (рисунок 1.24).

Стрелы прогибов при двухосном изгибе балки определяются по формуле

$$f_x = \frac{a^2 \cdot x}{8EJ_x} \cdot P, \quad f_y = \frac{a^2 \cdot y}{8EJ_y} \cdot P, \quad (1.4)$$

где E – модуль упругости материала первого рода;

J_x, J_y – осевые моменты инерции сечения в соответствующих плоскостях;

x, y – расстояние от центра тяжести сечения в соответствующих плоскостях;

P – растягивающая сила, образующаяся в процессе раскатки.

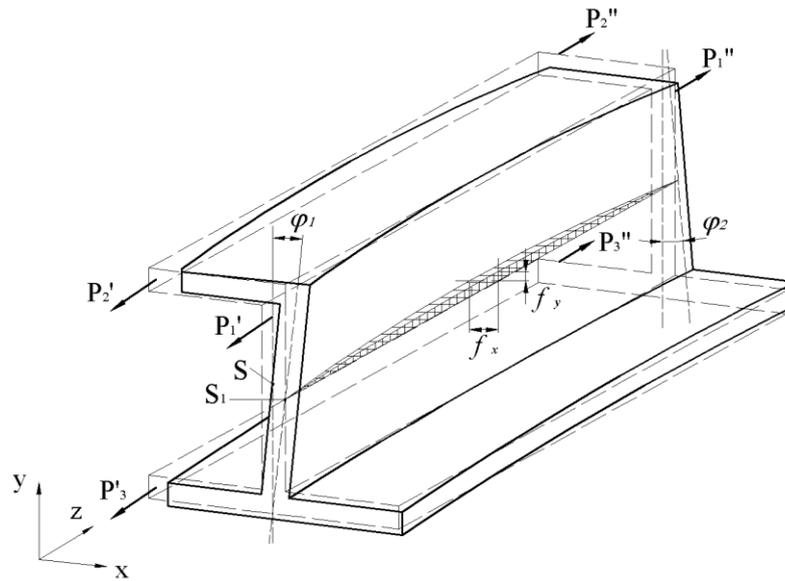


Рисунок 1.24 – Деформации балки при раскатке роликами [47]

В общем случае угол поворота поперечных сечений тонкостенных стержней рассчитывается на основе теории Власова [12] по формуле:

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi'_0 \operatorname{sh}(\beta z) + \frac{B_0}{GJ_d} (1 - \operatorname{ch}(\beta z)) + \frac{M_0}{\beta GJ_d} (\beta z - \operatorname{sh}(\beta z)), \quad (1.5)$$

где φ_0 – угол поворота поперечного сечения при $z=0$;

φ'_0 – депланация поперечного сечения при $z=0$;

z – расстояние между поперечными сечениями вдоль оси z ;

B_0 – бимомент;

G – модуль сдвига;

J_d – момент инерции на кручение поперечного сечения;

M_0 – крутящий момент;

$$\beta = \sqrt{\frac{GJ_d}{EJ_\omega}}. \quad (1.6)$$

Здесь J_ω – секториальный момент инерции.

Для получения/устранения заданной деформации обрабатываемого участка детали, зная геометрические и крутильные характеристики поперечного сечения,

можно определить совокупность растягивающих продольных сил и координаты точек их приложения:

$$\begin{aligned}\pm P_1 \cdot x_1 \pm P_2 \cdot x_2 \pm \dots \pm P_n \cdot x_n &= \frac{8EJ_x}{a^2} \cdot \Delta f_x; \\ \pm P_1 \cdot y_1 \pm P_2 \cdot y_2 \pm \dots \pm P_n \cdot y_n &= \frac{8EJ_y}{a^2} \cdot \Delta f_y; \\ P_1 \cdot \omega_1 + P_2 \cdot \omega_2 + \dots + P_n \cdot \omega_n &= -\frac{GJ_d}{2(1 - ch(\beta l / 2))} \cdot \Delta \theta.\end{aligned}\tag{1.7}$$

где a – база измерения стрелы прогиба;

Δf – полученная/устраняемая стрела прогиба;

w – секториальная площадь.

Построение зависимости эквивалентной растягивающей силы P от режимов раскатки роликами, названо автором [48] тарированием раскатного устройства и выполняется путём обработки и измерения стрел прогибов образцов-пластин из материала деталей на исследуемых режимах. Определение силы P производится с использованием формулы:

$$P = \frac{4EBH^3 f}{3a^2(H - 2z_h)},\tag{1.8}$$

где B – толщина образца;

H – высота образца;

f – стрела прогиба образца;

a – база измерения прогиба;

z_h – расстояние от верхней грани образца до точки приложения силы P , определяемое конструкцией раскатника.

Пример зависимости удельной внутренней силы, действующей на образец, от момента затяжки силового болта раскатника, показанного на рисунке 1.14, приведён на рисунке 1.25. Как показала практика, описанная методика расчета способна обеспечить точность технологических параметров только при условии, что растягивающие усилия определены на образцах, максимально приближенных к обрабатываемым деталям.

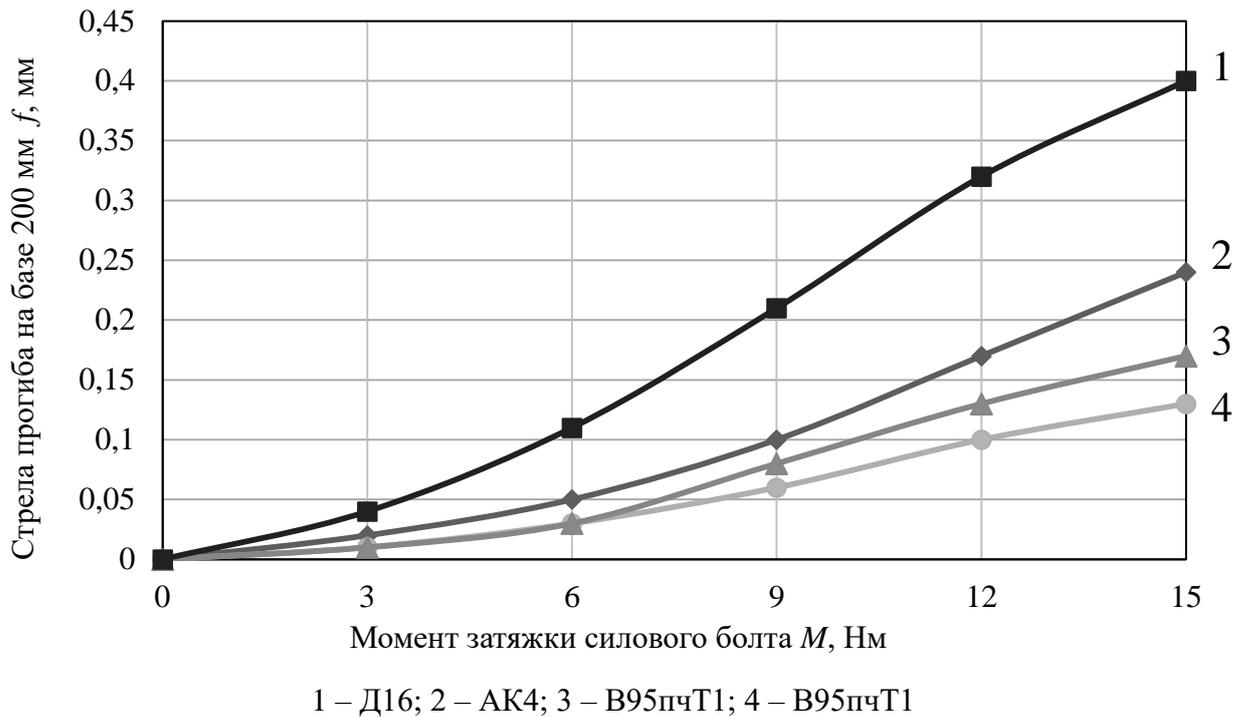


Рисунок 1.25 – Зависимости стрел прогибов образцов от момента затяжки силового болта раскатника [48]

Известен ряд публикаций, посвященных исследованию процесса раскатки роликами в рамках европейского проекта “COMPACT” [95, 104]. Авторы изучали влияние глубины внедрения роликов при раскатке на деформацию образца с помощью конечно-элементного моделирования в программном продукте FEM ABAQUS / Explicit (рисунки 1.26, 1.27). В результате установили влияние параметров процесса раскатки и геометрических характеристик модели образца на его деформацию. Полученные зависимости показаны на рисунке 1.28.

В процессе конечно-элементного моделирования была выведена зависимость растягивающей силы от глубины внедрения роликов и геометрических характеристик модели:

$$F(a, x) = (-0,891a^3 - 1,2394a^2 + 35,9273a + 367,1428)x + 0,0516a^3 - 0,1292a^2 - 2,133a - 2,0298 \quad (1.9)$$

где a – толщина ребра;

x – глубина внедрения роликов.

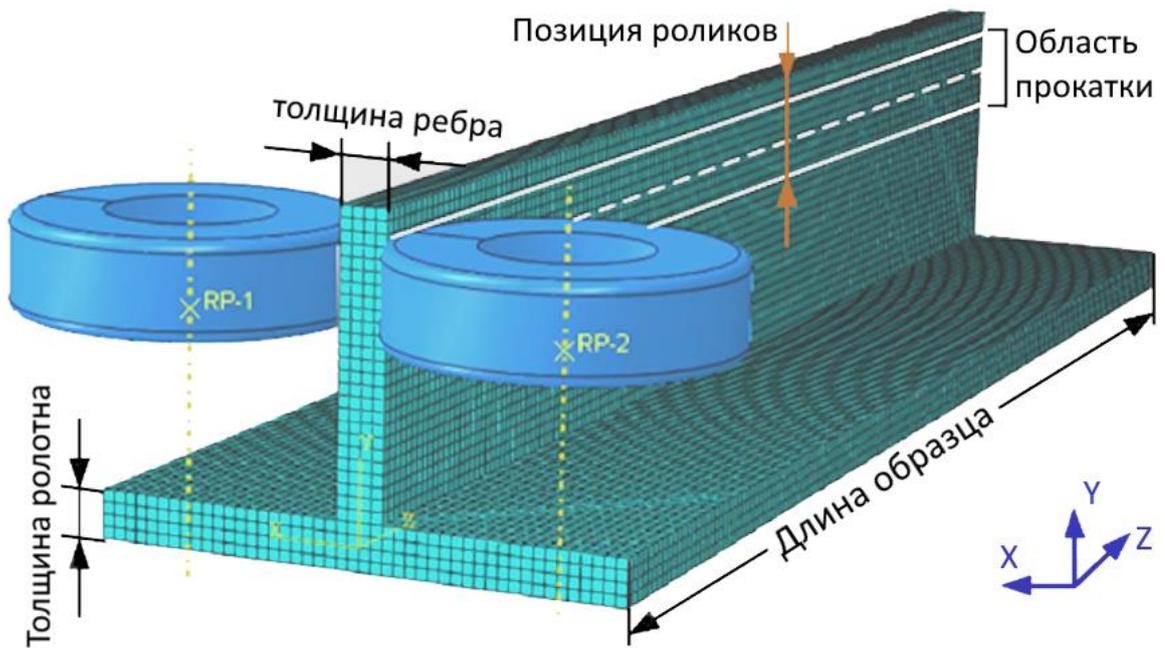
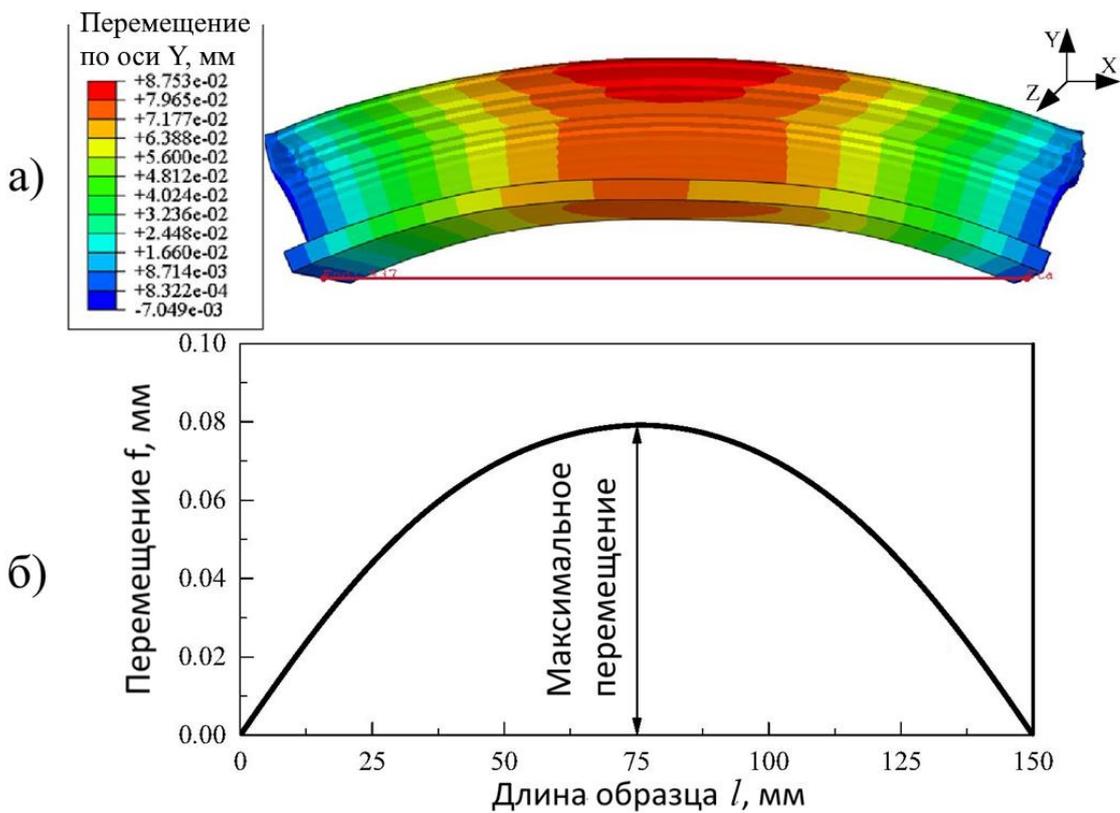
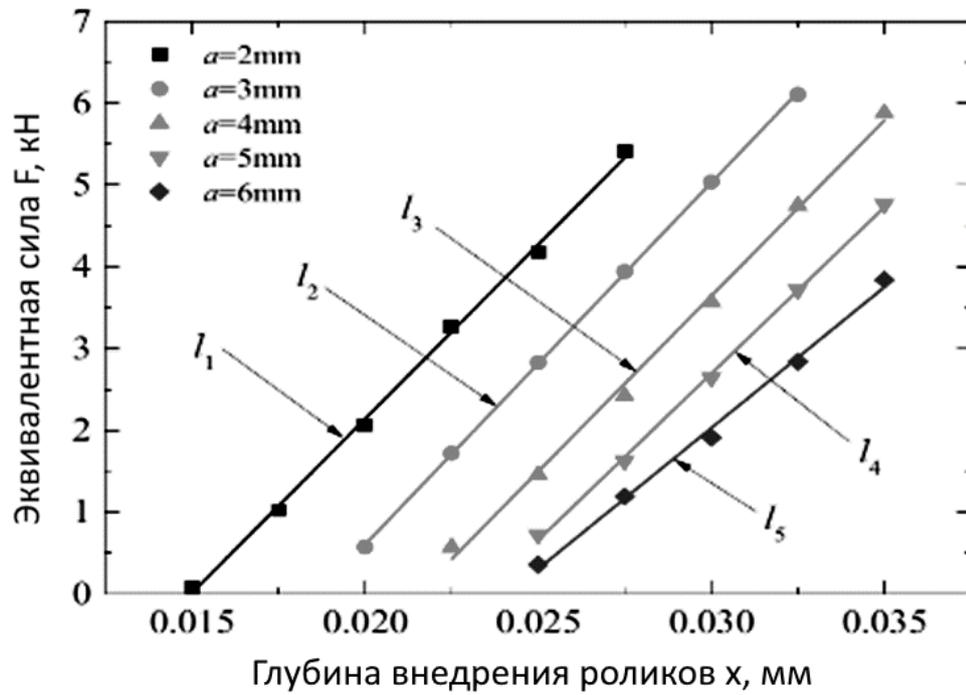


Рисунок 1.26 – Конечно-элементная модель процесса раскатки роликами, созданная в программном комплексе ABAQUS



а – деформация образца после раскатки роликами; б – искривление нижней плоскости модели по оси Y

Рисунок 1.27 – Характеристика деформации образца после прокатки [104]



$l_1 - a = 2$ мм; $l_2 - a = 3$ мм; $l_3 - a = 4$ мм; $l_4 - a = 5$ мм; $l_5 - a = 6$ мм

Рисунок 1.28 – Линии тренда эквивалентной силы в зависимости от глубины внедрения роликов и толщины полотна [104]

Технологии ДУФ посвящено большое количество публикаций [13, 27, 28, 30, 40, 45, 53, 68, 75, 84, 93]. В работах приведены результаты исследований, в которых устанавливаются значения внутренних силовых факторов процесса ДУФ, приводящих к формоизменению обрабатываемых деталей: растягивающей силы P , возникающей вследствие обработки дробью, и расстояния z_c от поверхности детали до точки её приложения. Растягивающую силу можно представить двумя компонентами: P_x , P_y (рисунок 1.29).

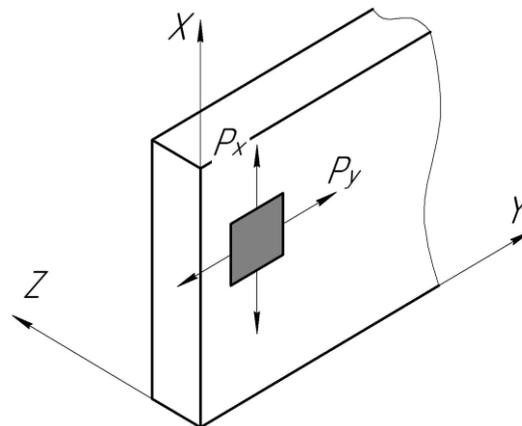


Рисунок 1.29 – Система координат и компоненты поверхностной нагрузки при ДУФ [68]

В результате ДУФ деталь получает деформацию, которая определяется относительным удлинением ε^ϕ и кривизной κ^ϕ , компоненты которых рассчитываются по формулам:

$$\varepsilon_j^\phi = \frac{P_j}{EH}; \quad (1.10)$$

$$\kappa_j^\phi = \frac{12M_j}{EK_y H_{np}^3},$$

где P_j – компоненты распределенной (на единицу длины) растягивающей внутренней силы ($j=x, y$);

H – толщина детали;

K_y – коэффициент вида НДС;

H_{np} – приведенная толщина детали, определяемая с учетом изменения жесткости ее продольного сечения в связи с изгибом;

M_j – компоненты изгибающего момента,

$$M_j = P_j(z_0 - z_{cj}); M_j = P_j(z_0 - z_{cj}). \quad (1.11)$$

Здесь z_0 – координата нейтрального слоя детали; z_{cj} – координата точек приложения компонент силы P_j .

Метод комбинированного формообразования раскатка (гибка) – ДУФ для деталей обшивки рассмотрен в [39, 45, 68, 83, 105]. Для нахождения внутренних силовых факторов процесса ДУФ используется теория начальных напряжений [34, 54, 71]. Интегральные значения начальных напряжений рассматриваются как несбалансированная нагрузка в виде приложенной к детали осевой силы и изгибающего момента, компенсирующимися внешними силами зажима. После раскрепления происходит деформация детали и перераспределение начальных напряжений по всему сечению. При этом создается равновесное напряженное состояние детали; начальные напряжения становятся остаточными [75] (рисунок 1.30).

Большинством аналитических решений определяется связь между режимными параметрами дробеобработки и деформированным состоянием поверхностного слоя обработанной детали. Степень поверхностной деформации определяется

критериями d/D или h/d , где D – диаметр дроби; h – глубина отпечатка; d – диаметр отпечатка. Данный способ проанализирован в [9, 23, 24, 42, 54, 75, 76].

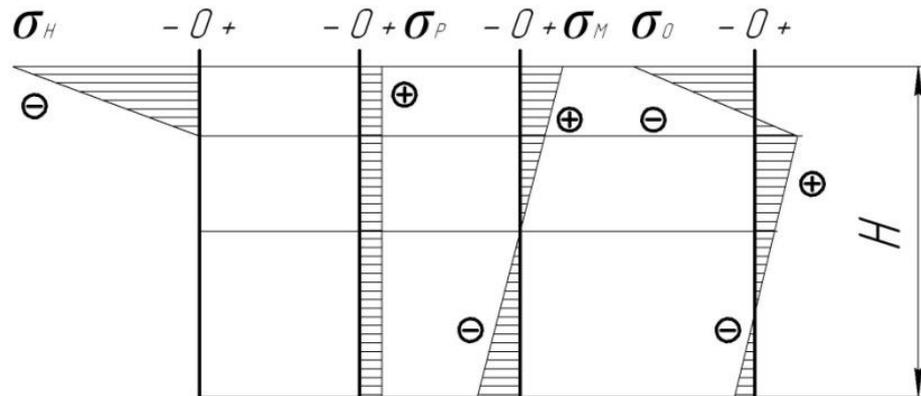


Рисунок 1.30 – Принципиальная схема образования остаточных напряжений при поверхностной обработке [75]

Эпюра остаточных напряжений σ_0 определяется алгебраическим суммированием эпюры начальных напряжений σ_H , эпюр от осевой силы σ_P и изгибающего момента σ_M [34]:

$$\sigma_0 = \sigma_H + \sigma_P + \sigma_M. \quad (1.12)$$

В [53, 105] приводится выражение для определения критерия d/D :

$$\frac{d}{D} = \left(\frac{2 \rho n_{дин} + 2 V^2}{3 g H_{дин}} \right)^{\frac{1}{n_{дин} + 2}}, \quad (1.13)$$

где $H_{дин}$, $n_{дин}$ – истинные динамическая твердость и показатель динамического упрочнения;

ρ – плотность материала дроби;

g – ускорение силы тяжести;

V – скорость удара.

Практическое использование такой методики вызывает ряд сложностей, обусловленных подготовкой исходных данных и проведением расчетов. Решением подобных проблем является автоматизация расчета с помощью применения САЕ систем на базе метода конечных элементов. Это позволяет повысить точность расчета и проводить анализ деталей с поперечным сечением различных геометрических

форм. Отечественные и зарубежные ученые использовали методы математического моделирования для анализа процессов обработки металлов давлением [5, 74, 98, 108].

Современный подход к конечно-элементному моделированию – это использование специализированных программных продуктов: Deform, MARC, NASTRAN, LS-DYNA, ANSYS и др. [33, 43, 70, 99]. Достижение заданной точности конечно-элементного моделирования процессов обработки металлов давлением обеспечивается с помощью создания достоверной модели обрабатываемого материала [16, 44, 91, 96, 101, 102]. Хотя в программных продуктах имеется “библиотека” различных материалов, потребность в решении задач с учетом анизотропии материала и процесса упрочнения не всегда позволяет их применять.

В качестве примера проанализируем работу А.Ю. Дьяка [22], где приведена общая структура определения параметров процесса ДУФ для деталей типа обшивок в системах MSC.NASTRAN, Marc. Расчёт выполняется в несколько этапов. Производится нагружение одного участка детали расчетной нагрузкой. Выходными данными моделирования является новый электронный макет поверхности, который используется в качестве исходного для определения потребных изгибающих моментов и параметров ДУФ для следующего участка и т.д. Результатом расчетов является распределение параметров процесса ДУФ по поверхности обрабатываемой детали.

Авторы [67, 105, 106] предлагают методику определения параметров процесса ДУФ. Расчет растягивающих сил и место их приложения осуществляется на основе эпюр напряжений, полученных с помощью конечно-элементного моделирования, где так же, как и при обработке на дробеметном аппарате, повторяются степень покрытия и глубина отпечатков. Следует отметить, что отпечатки располагаются случайным образом, но их количество и размер соответствуют конкретному режиму обработки. Расчет производится в нескольких этапов. Сначала исследуется микрорельеф обработанной поверхности пластины с получением данных по распределению диаметров отпечатков по фракциям, затем с помощью САЕ системы LS-Dyna выявляется зависимость скорости шарика от диаметра отпечатка. Далее

создается модель внедрения массива шариков в заготовку в виде параллелепипеда со случайным распределением и различными скоростями шариков, имитирующая процесс ДУФ (рисунок 1.31).

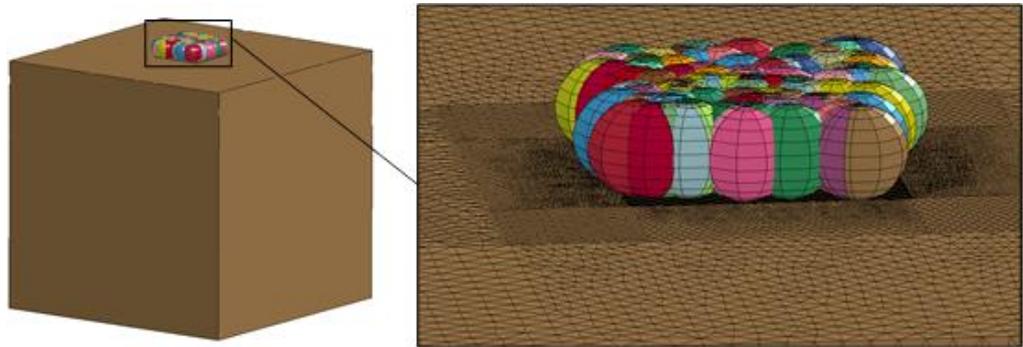
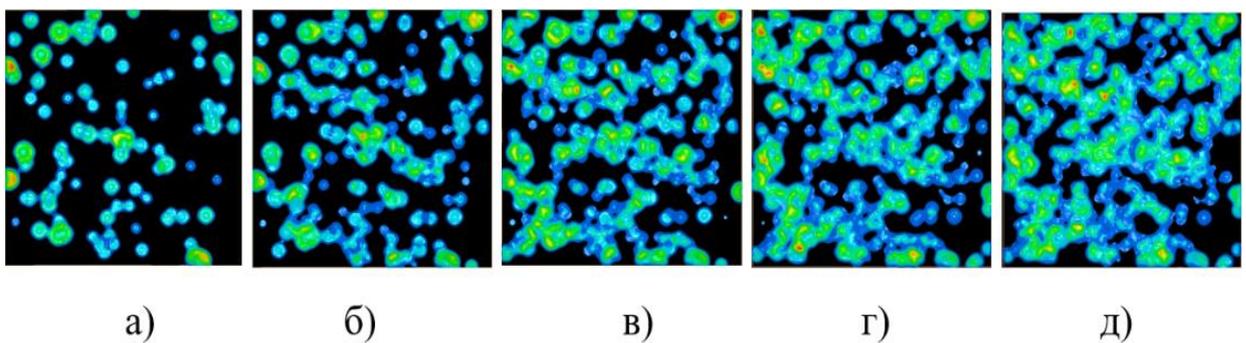


Рисунок 1.31 – Конечно-элементная модель процесса множественного внедрения шариков [67]

Для моделирования более интенсивной обработки производится повторное внедрение шариков со случайным распределением по поверхности. Результаты конечно-элементного моделирования, имитирующие процесс ДУФ с различным временем обработки, представлены на рисунке 1.32. На основании результатов моделирования получены эпюры остаточных нормальных напряжений в обработанной области (рисунок 1.33).



а – 4 с; б – 8 с; в – 12 с; г – 16 с; д – 20 с

Рисунок 1.32 – Распределения остаточной деформации при множественном внедрении при различном времени обработки [67]

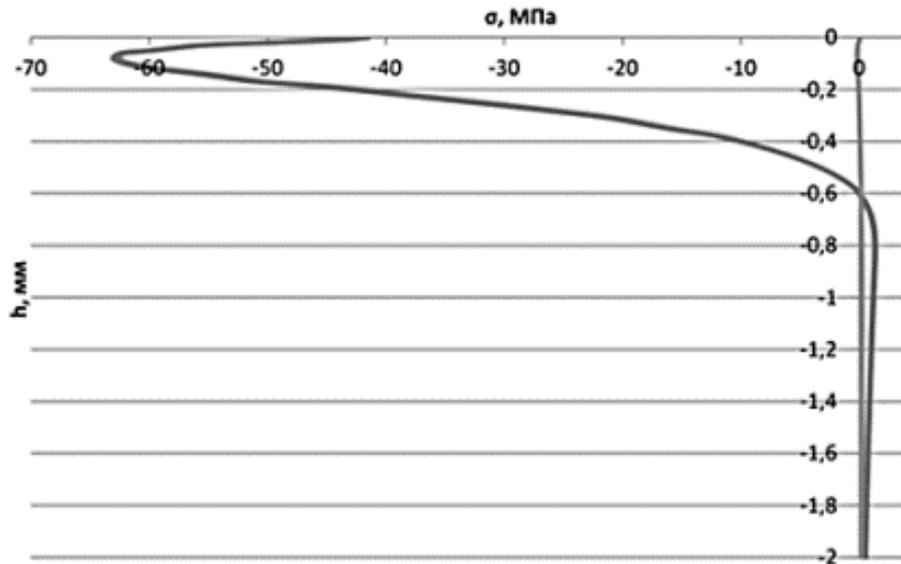
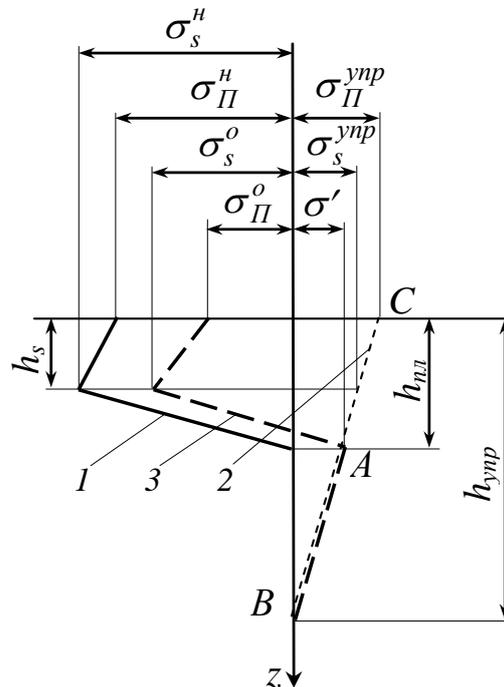


Рисунок 1.33 – Эпюра остаточных напряжений после множественных внедрений дроби в участок образца с ограничением свободы при закреплении [67]

При использовании теории начальных напряжений (рисунки 1.34, 1.35) были получены выражения (1.13) для определения внутренних силовых факторов ДУФ.



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

Рисунок 1.34 – Схема образования остаточных напряжений при обработке дробью [67]

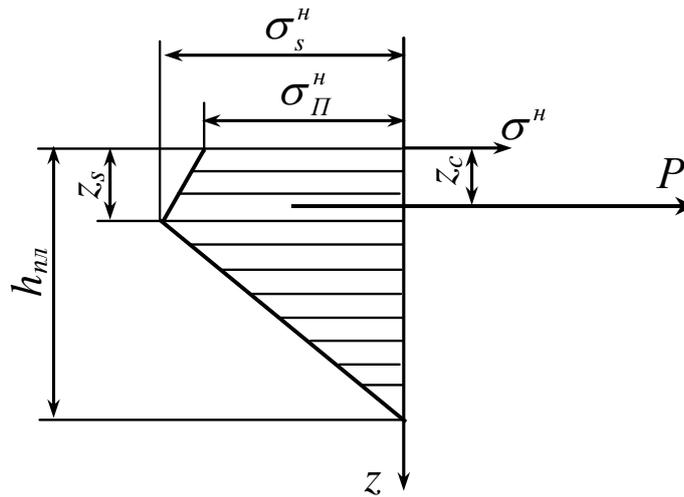


Рисунок 1.35 – Параметры распределения начальных напряжений в зоне обработки дробью [67]

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\Pi}^H &= \sigma_{\Pi}^o + \sigma_{\Pi}^{yup} = \sigma_{\Pi}^o - \sigma' \left(1 + \frac{h_{nл}}{h_{yup} - h_{nл}} \right); \\
 \sigma_s^H &= \sigma_s^o + \sigma_s^{yup} = \sigma_s^o - \sigma' \left(1 - \frac{h_s - h_{nл}}{h_{yup} - h_{nл}} \right); \\
 P_{e0} &= -\frac{1}{2} (\sigma_{\Pi}^H h_s + \sigma_s^H h_{nл}); \\
 z_c &= \frac{\sigma_{\Pi}^H h_s^2 + \sigma_s^H (3h_s^2 - 2h_s h_{nл} + h_{nл}^2)}{3(\sigma_{\Pi}^H h_s + \sigma_s^H h_{nл})}.
 \end{aligned} \tag{1.14}$$

Данные выражения позволяют производить расчет удельной растягивающей силы и места её залегания по эпюрам распределения остаточных напряжений, полученных с помощью моделирования процесса ДУФ.

1.4 Постановка цели и задач исследования

Анализ теоретических и практических исследований в области технологии изготовления монолитно-фрезерованных панелей позволяет сделать вывод о том, что перспективным направлением является использование и дальнейшее совершенствование

шенствование технологического сочетания РР–ДУФ. Придание деталям продольной кривизны с помощью раскатки рёбер роликами является производительным способом, обеспечивающим получение криволинейных поверхностей с требуемой точностью. Оборудование для реализации данного метода является компактным и относительно недорогим.

Существующие методики определения технологических параметров раскатки роликами рёбер реальных панелей не обеспечивают требуемой точности расчётов из-за необходимости в высокочисленных вычислениях с подбором эмпирических коэффициентов или в проведении большого объёма опытных работ на дорогостоящих конструктивно-подобных образцах.

Современные системы инженерного анализа позволяют моделировать различные технологические процессы, однако для моделирования указанного технологического сочетания необходимы соответствующие рекомендации.

Также на сегодняшний день нет технологического оборудования для реализации процесса раскатки рёбер в автоматическом режиме.

Исходя из вышеизложенного, была сформулирована цель диссертационной работы: совершенствование технологического сочетания “раскатка роликами — дробеударное формообразование” (РР-ДУФ) при изготовлении монолитно-фрезерованных панелей сложной формы с продольным оребрением на основе повышения достоверности методики расчёта технологических параметров за счёт применения систем инженерного анализа и автоматизированного оборудования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику определения исходных данных для расчета технологических параметров процесса формообразования панелей раскаткой роликами рёбер, основанной на прогнозировании продольной компоненты двухосного изгиба от последующей дробеударной обработки с целью компенсации технологической наследственности.

2. Разработать метод определения режимов ДУФ на основе подбора эквивалентной нагрузки, полученной в результате параметрического конечно-элементного моделирования.

3. Оценить степень взаимовлияния соседних рёбер подкреплённой панели в процессе реализации операции раскатки роликами с целью формирования продольной кривизны детали.

4. Разработать методику и выполнить моделирование процесса РР с применением систем нелинейного конечно-элементного анализа для изучения закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния детали.

5. Разработать конечно-элементную модель для определения режимов раскатки, обеспечивающих заданную продольную кривизну панелей, на основе моделирования на образцах в виде расчётных участков, тем самым исключая необходимость их опытной обработки.

6. Создать специализированное программное обеспечение, автоматизирующее расчёт режимов РР и генерацию управляющих программ для обработки на оборудовании с ЧПУ.

7. Провести экспериментальные исследования технологического процесса формообразования панелей с подкрепляющими рёбрами в последовательности РР–ДУФ для проверки достоверности разработанной методики расчёта.

8. Разработать специализированную установку с ЧПУ для формообразования и правки подкреплённых рёбрами деталей раскаткой роликами.

9. Подготовить технологические рекомендации по формообразованию продольно-оребрённых панелей комбинированным методом “раскатка роликами – дробеударное формообразование” на оборудовании с ЧПУ.

2 Моделирование процесса формообразования панели с продольным оребрением в технологическом сочетании “раскатка рёбер – дробеударное формообразование”

2.1 Общие положения

Технологическое сочетание “раскатка рёбер – дробеударное формообразование” (РР-ДУФ) в производстве монолитно-фрезерованных панелей сложной формы с продольным оребрением реализуется в последовательности, приведённой на рисунке 1.5.

Операция РР, предназначенная для получения продольной компоненты кривизны контура панели, заключается в последовательной обработке рёбер с применением специального оборудования с рабочими органами в виде раскатных устройств. Такая очерёдность операций, принятая в производственной практике, обусловлена технологической целесообразностью: формировать продольную кривизну раскаткой удобнее на плоской заготовке. При необходимости операция РР может применяться и после ДУФ для окончательной доводки геометрии детали.

Назначение операции ДУФ – образование поперечной кривизны детали путём обработки дробью (шариками) её наружной (аэродинамической) поверхности. Операция может быть выполнена на любом оборудовании для дробеударной обработки. Наиболее эффективным способом является обработка полосами различной ширины с применением дробемётных аппаратов контактного типа при закреплении детали в вертикальном положении в продольном теоретическом контуре. Для реализации данной технологической схемы разработаны установки серии УДФ, на которых за один установ детали выполняются две стадии обработки: программная формообразующая и доводочная, совмещённая с контролем формы шаблонами контура сечения (ШКС) или электронными измерительными устройствами. Это обеспечивает широкие возможности по достижению точности контура.

Нежелательная продольная компонента кривизны, возникающая при ДУФ, является проявлением технологической наследственности данной операции. Эта компонента должна быть рассчитана и скомпенсирована на предшествующей операции РР.

Запишем уравнение (1.1), определяющее взаимосвязь процессов получения поперечной и продольной кривизны в комбинированных технологических процессах [66, 68], применительно к панелям с продольным оребрением, подвергаемым формообразованию в технологическом сочетании РР–ДУФ:

$$k_y^{mp} = k_y^{ДУФ} + k_y^{РР} + k^{ФР}, \quad (2.1)$$

где k_y^{mp} – требуемое значение продольной кривизны образуемого участка панели ($k = 1/R$, R – радиус кривизны);

$k_y^{ДУФ}$ – продольная кривизна, образуемая при ДУФ;

$k_y^{РР}$ – продольная кривизна, образуемая при РР;

$k^{ФР}$ – кривизна детали после фрезерования. В расчётах принимается её нулевое значение. Фактическая же кривизна учитывается при операциях ДУФ и РР на основе предварительных измерений, проводимых перед расчётом режимов обработки.

В качестве правила знаков принимаем, что положительной является кривизна, полученная при ДУФ. Для повышения точности расчета параметров формообразования панелей в технологической последовательности РР–ДУФ выполняем конечно-элементное моделирование операций процесса с использованием программного обеспечения LSTC LS-DYNA Version F14 [57]. Выбор программного обеспечения обусловлен возможностью производить нелинейный конечно-элементный анализ динамических процессов, который сопровождается решением дифференциальных уравнений явным методом. В таком методе задействованы рекуррентные соотношения, по которым вычисляют перемещение, скорость и ускорение на данном шаге через их значения на предшествующих шагах. Метод используется для решения трехмерных динамических нелинейных задач (например, обработка металлов давлением) с учетом малого шага интегрирования [33].

2.2 Прогнозирование продольной деформации панелей на основе моделирования процесса дробеударного формообразования

При моделировании процесса ДУФ с применением методики, описанной в работе [67] определяем внутренние силовые факторы процесса, вызывающие формоизменение деталей в процессе обработки дробью: удельную распределённую растягивающую силу $P_{\text{дф}}$ с учётом координаты точки её приложения (расстояние от обработанной поверхности) z_c . По результатам моделирования сформируем фрагмент базы данных внутренних силовых факторов процесса ДУФ в зависимости от времени обработки на дробемётном аппарате 3Д400М (диаметр дробеметного колеса 400 мм) установки УДФ-4 (см. рисунок 1.10) со следующими режимами и условиями обработки:

- дробь диаметром 3,5 мм из стали ШХ15;
- скорость подачи, мм/мин: $s = 420; 525; 700; 1\ 050; 2\ 100$;
- частота вращения дробеметного колеса, мин⁻¹: $N_{\text{ДА}} = 600; 800; 1\ 000$.

Время обработки (воздействия дроби на участок поверхности детали) определяем по формуле:

$$t_o = \frac{l_{3.o.}}{s}, \quad (2.2)$$

где $l_{3.o.}$ – ширина зоны обработки дробеметного аппарата ($l_{3.o.} = 140$ мм).

Моделирование процесса ДУФ выполняли в соответствии с методикой и условиями, предложенными в [67]. Параметры распределения начальных напряжений (НН) в зоне обработки дробью согласно рисунку 1.35 приведены в таблице 2.1.

Эпюры нормальных остаточных напряжений (ОН), полученные на основе обработки в программе Excel результатов моделирования процесса ДУФ на участке поверхности с размерами 3×20×20 мм, выделенной на модели параллелепипеда, из материала В95пчТ2 с размерами 50×50×50 мм приведены на рисунке 2.1.

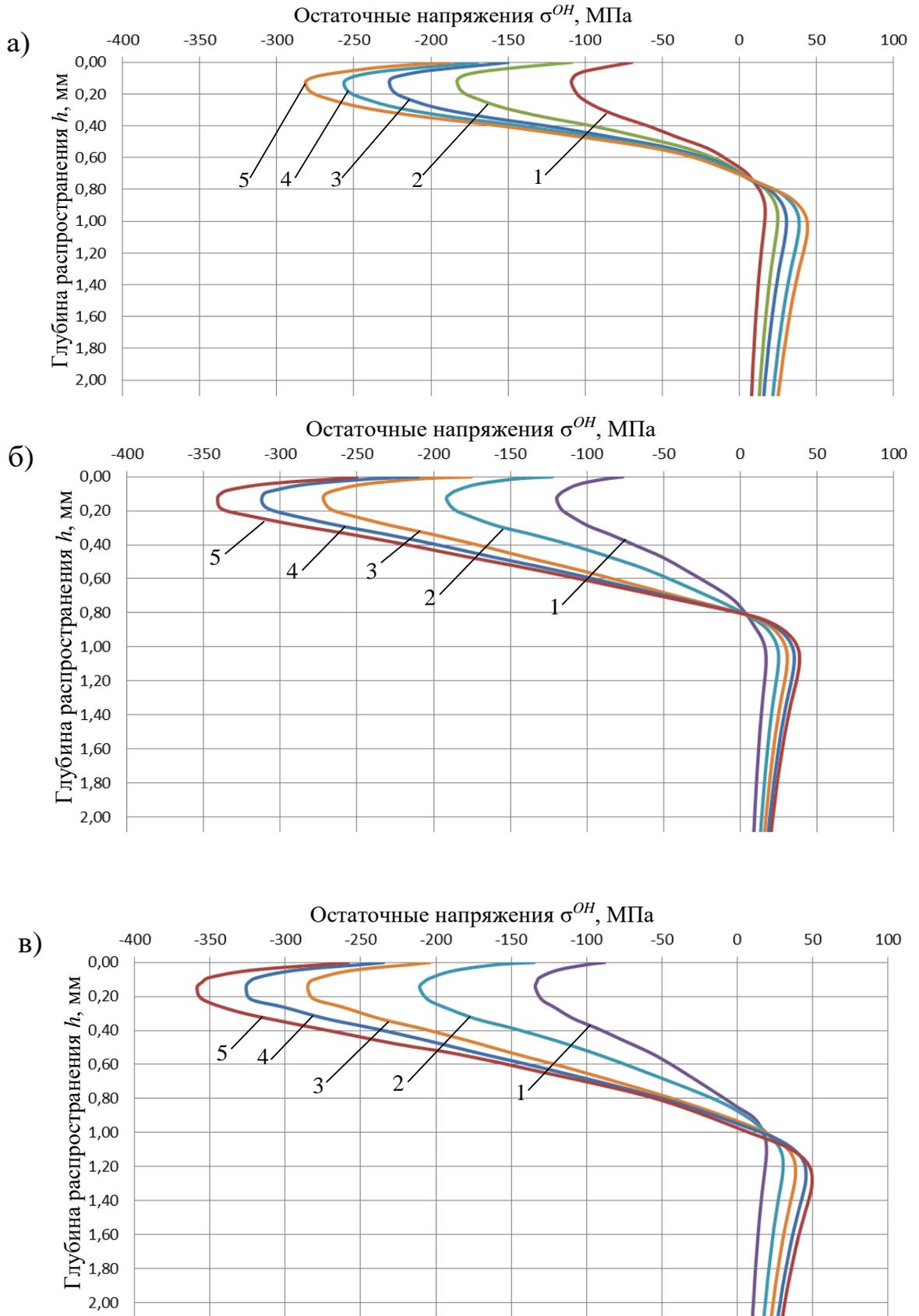
Таблица 2.1 – Параметры расчетных эпюр НН, возникающих при ДУФ

| $N_{ДА}, \text{мин}^{-1}$ | $t_o, \text{с}$ | $h_s, \text{мм}$ | $h_{нл}, \text{мм}$ | $\sigma_{II}^o, \text{МПа}$ | $\sigma_s^o, \text{МПа}$ |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 600 | 4 | 0,1 | 0,68 | -74,5 | -108 |
| | 8 | 0,11 | 0,68 | -119,5 | 181,9 |
| | 12 | 0,11 | 0,69 | -160,5 | -225,3 |
| | 16 | 0,12 | 0,71 | -170,3 | -244,8 |
| | 20 | 0,13 | 0,72 | -175,2 | -250,2 |
| 800 | 4 | 0,12 | 0,76 | -81,9 | -119,8 |
| | 8 | 0,12 | 0,78 | -131,1 | -191,7 |
| | 12 | 0,14 | 0,82 | -187,5 | -274,1 |
| | 16 | 0,15 | 0,83 | -195,7 | -283,7 |
| | 20 | 0,15 | 0,83 | -199,8 | -289,3 |
| 1 000 | 4 | 0,13 | 0,86 | -94,2 | -135 |
| | 8 | 0,14 | 0,88 | -144,2 | 210,8 |
| | 12 | 0,15 | 0,93 | -206,1 | -287,8 |
| | 16 | 0,16 | 0,95 | -210,5 | 297,3 |
| | 20 | 0,16 | 0,96 | -213,4 | -305,1 |

Результаты расчетов внутренних силовых факторов ДУФ по формулам (1.14) представлены в таблице 2.2; графики зависимости удельной растягивающей силы от времени обработки – на рисунке 2.2.

Таблица 2.2– Рассчитанные значения внутренних силовых факторов ДУФ

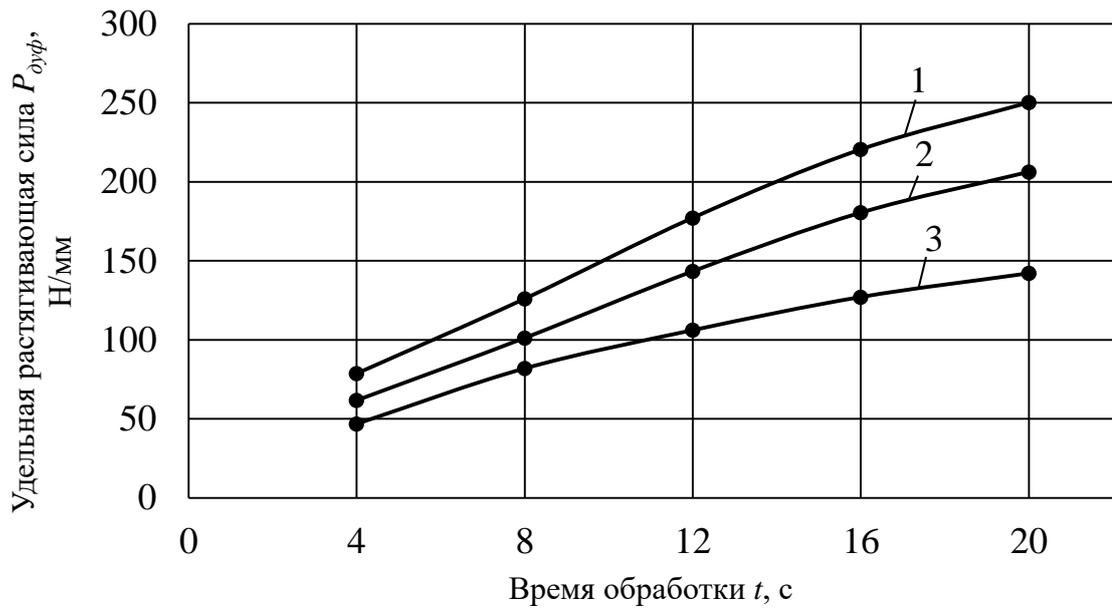
| $N_{ДА}, \text{мин}^{-1}$ | $t, \text{с}$ | $P_{д\text{уф}}, \text{Н/мм}$ | $z_c, \text{мм}$ |
|---------------------------|---------------|-------------------------------|------------------|
| 600 | 4 | 46,8 | 0,16 |
| | 8 | 81,9 | 0,15 |
| | 12 | 106,1 | 0,15 |
| | 16 | 127,1 | 0,15 |
| | 20 | 142,1 | 0,14 |
| 800 | 4 | 61,7 | 0,17 |
| | 8 | 101,2 | 0,18 |
| | 12 | 143,0 | 0,19 |
| | 16 | 180,5 | 0,19 |
| | 20 | 206,25 | 0,19 |
| 1 000 | 4 | 78,7 | 0,20 |
| | 8 | 126,0 | 0,20 |
| | 12 | 177,2 | 0,21 |
| | 16 | 220,5 | 0,21 |
| | 20 | 250,15 | 0,21 |



а – $N_{ДА} = 600 \text{ мин}^{-1}$; б – $N_{ДА} = 800 \text{ мин}^{-1}$; в – $N_{ДА} = 1000 \text{ мин}^{-1}$

1 – $t_0 = 4 \text{ с}$; 2 – $t_0 = 8 \text{ с}$; 3 – $t_0 = 12 \text{ с}$; 4 – $t_0 = 16 \text{ с}$; 5 – $t_0 = 20 \text{ с}$

Рисунок 2.1 – Эпюры остаточных нормальных напряжений, полученные по результатам моделирования процесса ДУФ ($D = 3,5$)



1 – $N_{ДА} = 1000 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $N_{ДА} = 800 \text{ мин}^{-1}$; 3 – $N_{ДА} = 600 \text{ мин}^{-1}$

Рисунок 2.2 – Зависимость удельной растягивающей силы, возникающей при ДУФ от времени обработки при частоте вращения дробебетного колеса

Определяем деформированное состояние КПО панели крыла самолёта из алюминиевого сплава В95пчТ2 длиной 250 мм с тремя ребрами. На основе ЭМД создана конечно-элементная модель (КЭМ) КПО, состоящая из 663 600 гексаэдральных элементов и 768 624 узлов (рисунок 2.3).

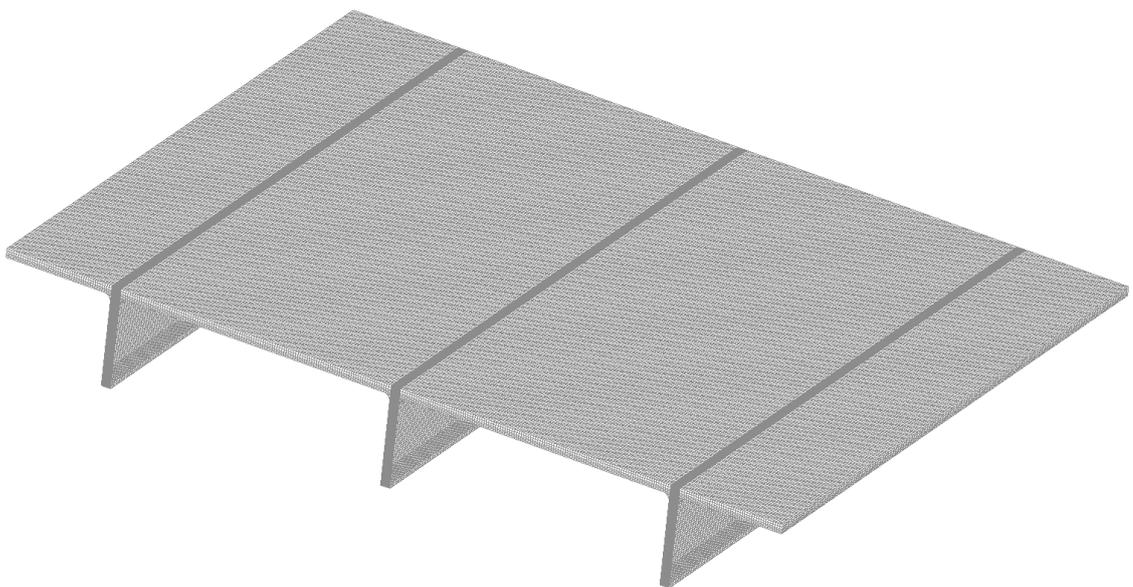


Рисунок 2.3 – Сетка конечных элементов для моделирования ДУФ образца панели

Цель моделирования:

- определить режимы ДУФ, необходимые для достижения требуемой поперечной кривизны с радиусом $R_x^{mp} = 6$ м ($k_x^{mp} = 0,167$ 1/м) на участке детали с линейчатой поверхностью ($k_y^{mp} = 0$);
- рассчитать продольную кривизну $k_y^{ДУФ} = 1/R_y^{ДУФ}$, возникающую при ДУФ и подлежащую компенсации в процессе РР;
- определить режимы ДУФ, требуемые для формообразования зоны перегиба детали при $R_x^{mp} = 6$ м и $R_y^{mp} = 25$ м.

Нагружение образца осуществляется путём приложения распределенных растягивающих сил $P_{дуф}$, на расстоянии z_c от поверхности детали (рисунок 2.4). При деформации детали векторы силы поворачиваются и продолжают действовать по нормали к плоскости приложения.

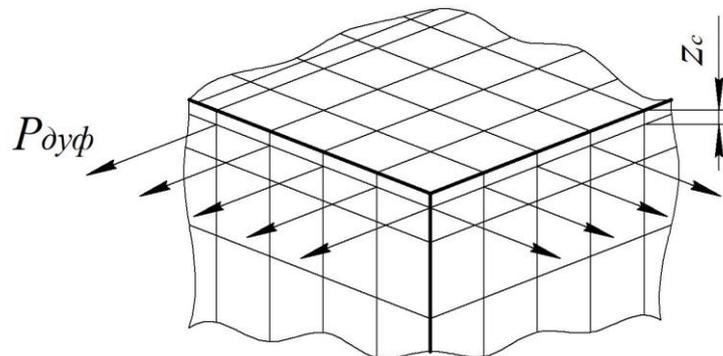


Рисунок 2.4 – Схема приложения распределенной силы для моделирования процесса ДУФ

Для конечно-элементного моделирования используется модель анизотропного упругопластического материала:

- упругие деформации и напряжения вычисляются по формуле $\sigma = \varepsilon E$;
- зависимость напряжений от деформаций определяется с помощью кривой нагружения, созданной по аппроксимированным результатам испытаний образцов на растяжение согласно ГОСТу 1497-84 (рисунок 2.5).

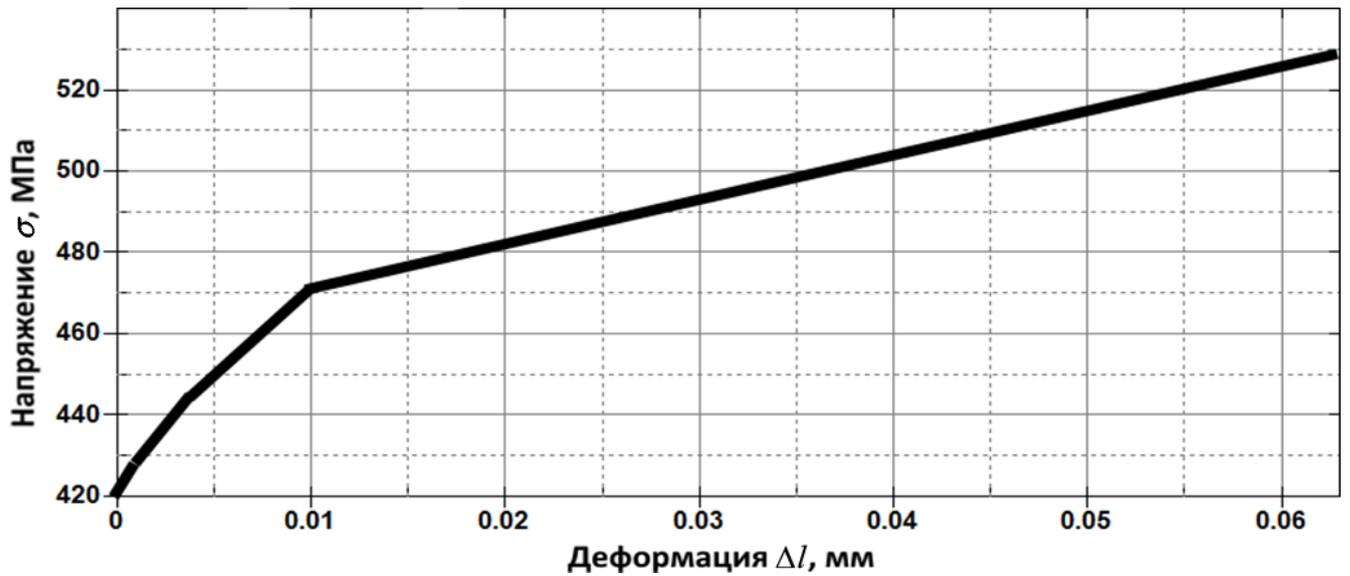


Рисунок 2.5 – Кривая зависимости напряжение – деформация для материала В95пчТ2

Функция пластичности рассчитывается по критерию Мизеса - Хилла:

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1, \quad (2.3)$$

где F, G, H, L, M, N – коэффициенты анизотропии, которые определяются экспериментально с учётом одноосного растяжения стандартных образцов в двух направлениях.

Механические свойства материала представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Механические свойства материала В95пчТ2

| Показатель | Ед. изм. | Значение показателей |
|---|--------------------|----------------------|
| Модуль упругости E | МПа | 70 200 |
| Плотность ρ | кг/мм ³ | $2,85 \cdot 10^{-9}$ |
| Коэффициент Пуассона μ | - | 0,33 |
| Предел текучести σ_{02} | МПа | 457 |
| Относительная деформация ε_{02} | мм | 0,0004 |
| Предел прочности σ_B | МПа | 630 |
| Коэффициент анизотропии А | - | 0,54 |
| Коэффициент анизотропии В | - | 0,75 |
| Коэффициент анизотропии С | - | 0,5 |

В результате моделирования методом последовательного перебора значений внутренних силовых факторов $P_{\text{дуф}}$ и z_c из сформированного фрагмента базы данных (таблица 2.4) были определены:

1. Режимы ДУФ, необходимые для получения КПО с радиусом одинарной поперечной кривизны $R_x^{mp} = 6$ м ($s = 1050$ мм/мин; $N_{ДА} = 800$ мин⁻¹; $t = 8$ с), которым соответствуют внутренние силовые факторы $P_{\text{дуф}} = 101,2$ Н/мм; $z_c = 0,18$ мм. В результате ДУФ КПО приобрёл продольную кривизну с радиусом $R_y^{ДУФ} = 155$ м ($k_y^{ДУФ} = 0,006452$ 1/м), которую необходимо компенсировать раскаткой роликами. Так как для КПО с линейчатой поверхностью $k_y^{mp} = 0$, то с учётом формулы (2.1) в данном случае

$$k_y^{PP} = -k_y^{ДУФ} = -0,006452 \text{ 1/м.}$$

2. Режимы ДУФ, необходимые для получения КПО знакопеременной двойной кривизны с $R_x^{mp} = 6$ м и $R_y^{mp} = 25$ м ($s = 933$ мм/мин; $N_{ДА} = 1\ 000$ мин⁻¹; $t_{обр} = 9$ с), для которых $P_{\text{дуф}} = 139$ Н/мм; $z_c = 0,20$ мм. С учётом компенсации нежелательной продольной кривизны, образовавшейся при ДУФ:

$$k_y^{PP} = -0,04 - 0,006452 = -0,046452 \text{ 1/м.}$$

Таблица 2.4 – Фрагмент базы данных внутренних силовых факторов, возникающих в материале В95пчТ2 в зависимости от режимов обработки

| Номер режима обработки | Подача s, мм/мин | Частота вращения дробемётного аппарата $N_{ДА}$, мин ⁻¹ | Время обработки t, с | Внутренняя сила $P_{\text{дуф}}$, Н/мм | Координата точки приложения силы $P_{\text{дуф}}$ z_c , мм |
|------------------------|------------------|---|----------------------|---|--|
| 1 | 2 100 | 600 | 4 | 46,8 | 0,16 |
| 2 | 1 050 | 600 | 8 | 81,9 | 0,15 |
| 3 | 700 | 600 | 12 | 104,1 | 0,15 |
| 4 | 2 100 | 800 | 4 | 61,7 | 0,17 |
| 5 | 1 050 | 800 | 8 | 101,2 | 0,18 |
| 6 | 700 | 800 | 12 | 147 | 0,19 |
| 7 | 2 100 | 1 000 | 4 | 78 | 0,20 |
| 8 | 1 050 | 1 000 | 8 | 126 | 0,20 |
| 9 | 700 | 1 000 | 12 | 179 | 0,21 |
| ... | | | | | |

На рисунке 2.6 показана деформированная модель КПО после нагружения.

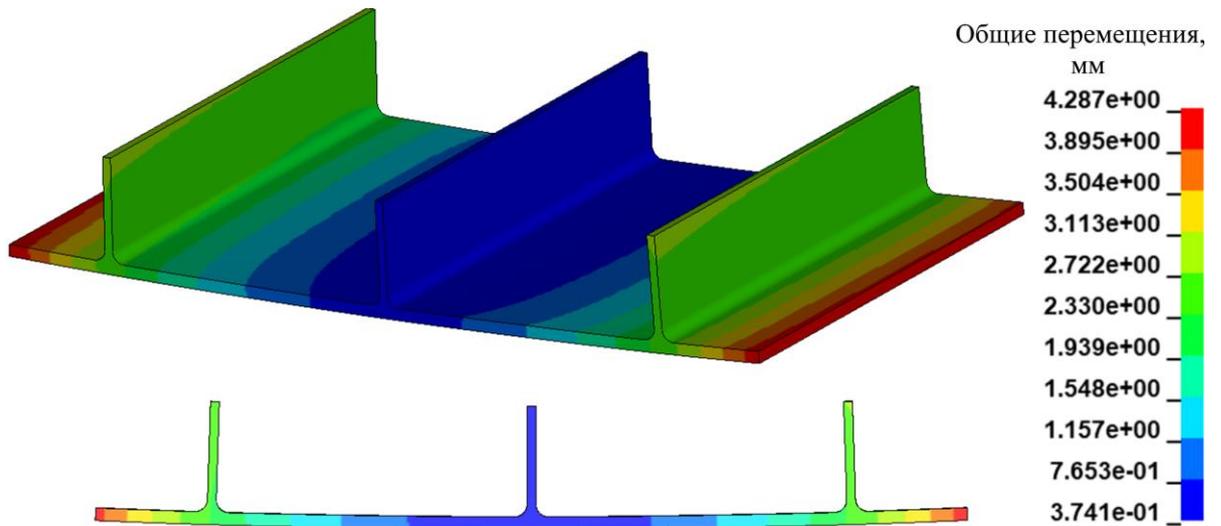


Рисунок 2.6 – Результат моделирования операции ДУФ на КПО панели

Таким образом, с использованием описанной методики моделирования процесса ДУФ могут быть определены исходные данные для дальнейшего расчета параметров процесса раскатки роликами в технологической последовательности РР–ДУФ.

2.3 Моделирование процесса раскатки роликами рёбер панелей

Для оценки применимости расчётных моделей процесса раскатки роликами, предложенных авторами [46, 47, 95, 104], в которых для определения результатов воздействия на обрабатываемую деталь в процессе РР используется её нагружение эквивалентной растягивающей силой, выполнено моделирование в системе LS-DYNA и произведено его сравнение с результатами расчётов по методике, приведённой в [46].

Моделирование выполнялось на образцах-пластинах со следующими параметрами (согласно [46]): толщина $B = 2...10$ мм; высота $H = 30$ мм; длина $L = 250$ мм. Модель пластины в зоне раскатки роликами имеет конечно-элементную сетку размером $0,5 \times 0,5$ мм, в остальной части $0,5 \times 1$ мм. По толщине пластины

сетка имеет сгущения у обрабатываемых поверхностей; минимальный размер в зоне обработки – 0,0659 мм, максимальный размер в середине – 0,2593 мм. Длина обрабатываемого участка пластины – 210 мм. Пластина закреплена за торцевой участок, к которому двигаются ролики. Размеры роликов: диаметр 32 мм; ширина 6 мм. Модель роликов состоит из гексаэдральных элементов с размерами 0,5x0,5x0,5 мм. Моделирование осуществляется в три этапа: внедрение роликов в пластину, раскатка пластины роликами и отвод роликов. Используемые параметры моделирования: глубина внедрения роликов 0,01–0,05 мм с шагом 0,0025 мм, расстояние от центра роликов до центра тяжести сечения пластины 2; 6; 10 мм. Расположение системы координат следующее: ось X – по толщине пластины, ось Y – по длине, ось Z – по высоте (рисунок 2.7).

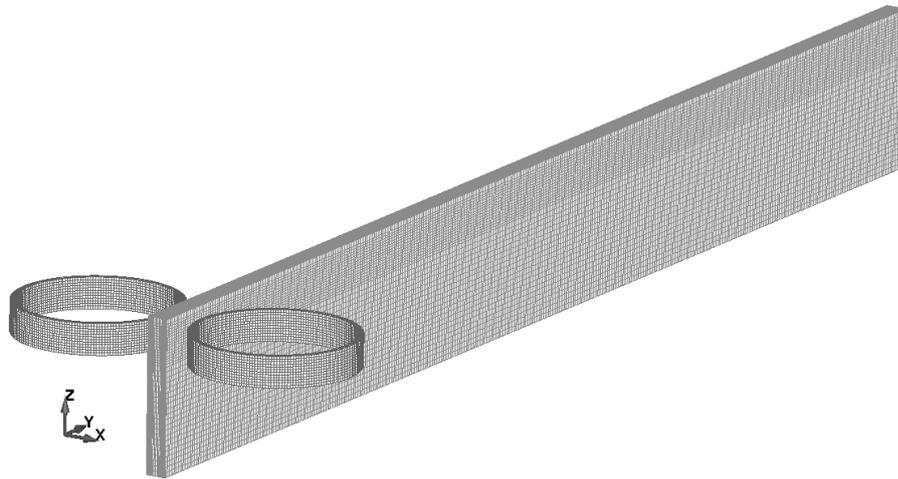


Рисунок 2.7 – Конечно-элементные модели процесса раскатки пластины роликами

При моделировании используется тип контакта между роликом и заготовкой “AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE”. Такой тип контакта имеет особенности: место взаимодействия тел осуществляется без ограничений и без использования дополнительных опций программы; симметричный тип контакта обеспечивает отслеживание проникновения узлов контактной поверхности через сегменты поверхности.

В расчётной модели использованы следующие значения коэффициентов трения для пары сталь–алюминий [1]: покоя – 0,61, скольжения – 0,47. Материал роликов – абсолютно жестким. Такое упрощение обусловлено изготовлением роликов из закалённой стали ШХ15 и необходимостью уменьшения времени расчета.

Предварительное моделирование показало одинаковые деформации образцов при использовании указанных материалов.

Размеры сетки в деформируемом направлении в соответствии с требованиями разработчиков программного продукта [57], не должны быть больше чем в 10 раз величины деформации, то есть при внедрении ролика на 0,02 мм максимальная толщина элемента должна составлять 0,2 мм. Для корректного расчета 8-узловых шестигранных элементов с соотношением сторон, различающихся в разы, активирована карта настроек SECTION_SOLID ELFORM. Все узлы сетки являются полностью связными, то есть узел одного элемента располагается в узле другого элемента. В связи с ограниченными вычислительными мощностями размеры элементов сетки вне обрабатываемой части имеют увеличенные размеры. Результаты моделирования приведены на рисунке 2.8.

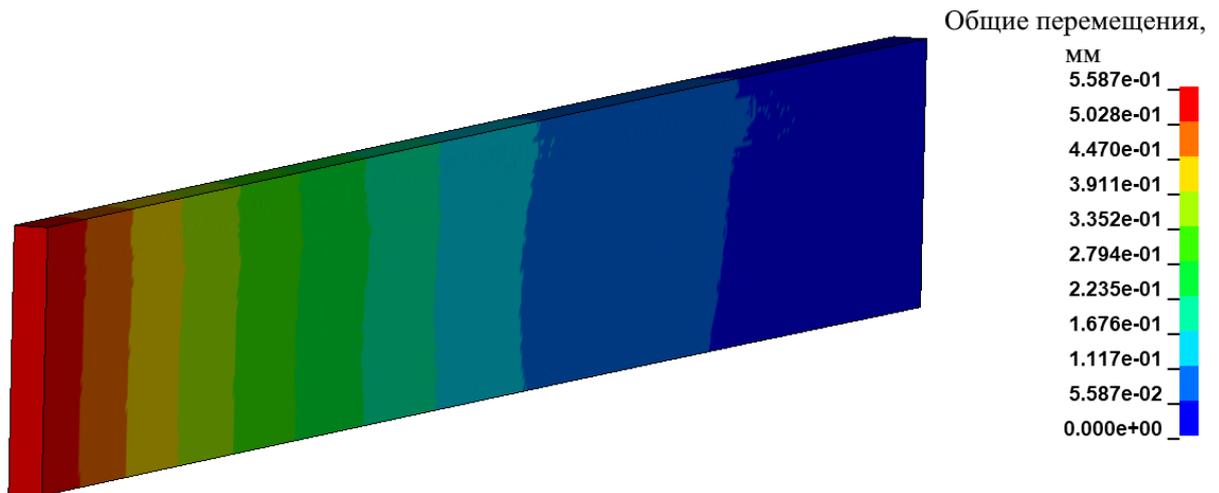


Рисунок 2.8 – Деформированная модель пластины, подвергнутой РР

Результаты конечно-элементного моделирования пластины позволят исследовать напряжённо-деформированное состояние материала, формируемое при раскатке роликами, и оценить методику расчёта формоизменения деталей при РР, основанную на нагружении пластин эквивалентной растягивающей силой.

2.3.1 Исследование напряженно-деформированного состояния материала деталей, формируемого раскаткой роликами.

Результаты моделирования процесса раскатки роликами в центральной части пластины в сечении А–А (рисунок 2.9) толщиной 4 мм из материала ВТ95пчТ2 приведены на рисунках 2.10 – 2.14.

Распределение перемещений металла пластины после раскатки роликами по осям системы координат, приведённой на рисунке 2.9, показано на рисунке 2.10.

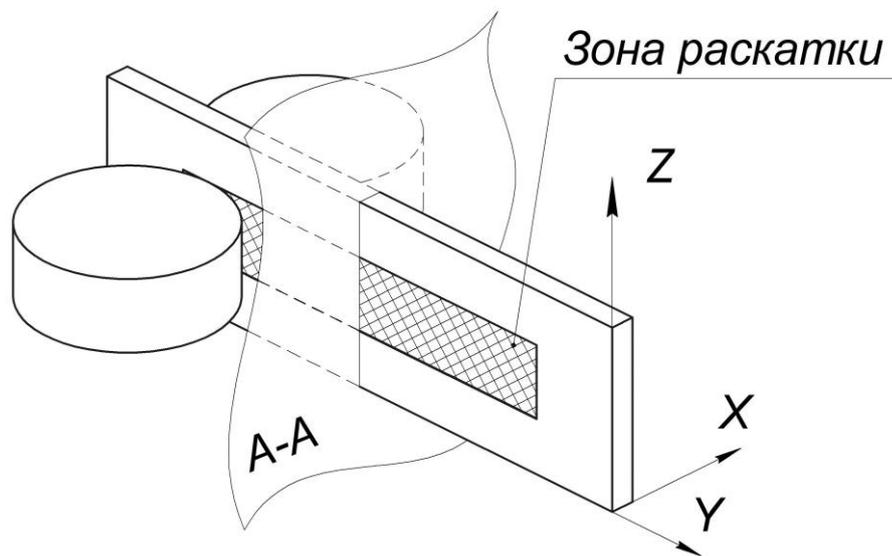


Рисунок 2.9 – Расположение сечения А–А на обрабатываемой пластине

На рисунке 2.10 видно, что в области контакта с роликами происходит симметричное относительно оси пластины монотонно затухающее смещение слоёв металла по оси X (по толщине пластины) от поверхности к серединным слоям. Область смещения имеет форму сегмента круга. Перемещения по оси Z (по ширине пластины) симметричны и распространяются в разные стороны от области контакта с роликами. В районе оси контакта перемещения отсутствуют. При этом перемещение слоёв металла по длине пластины равномерное.

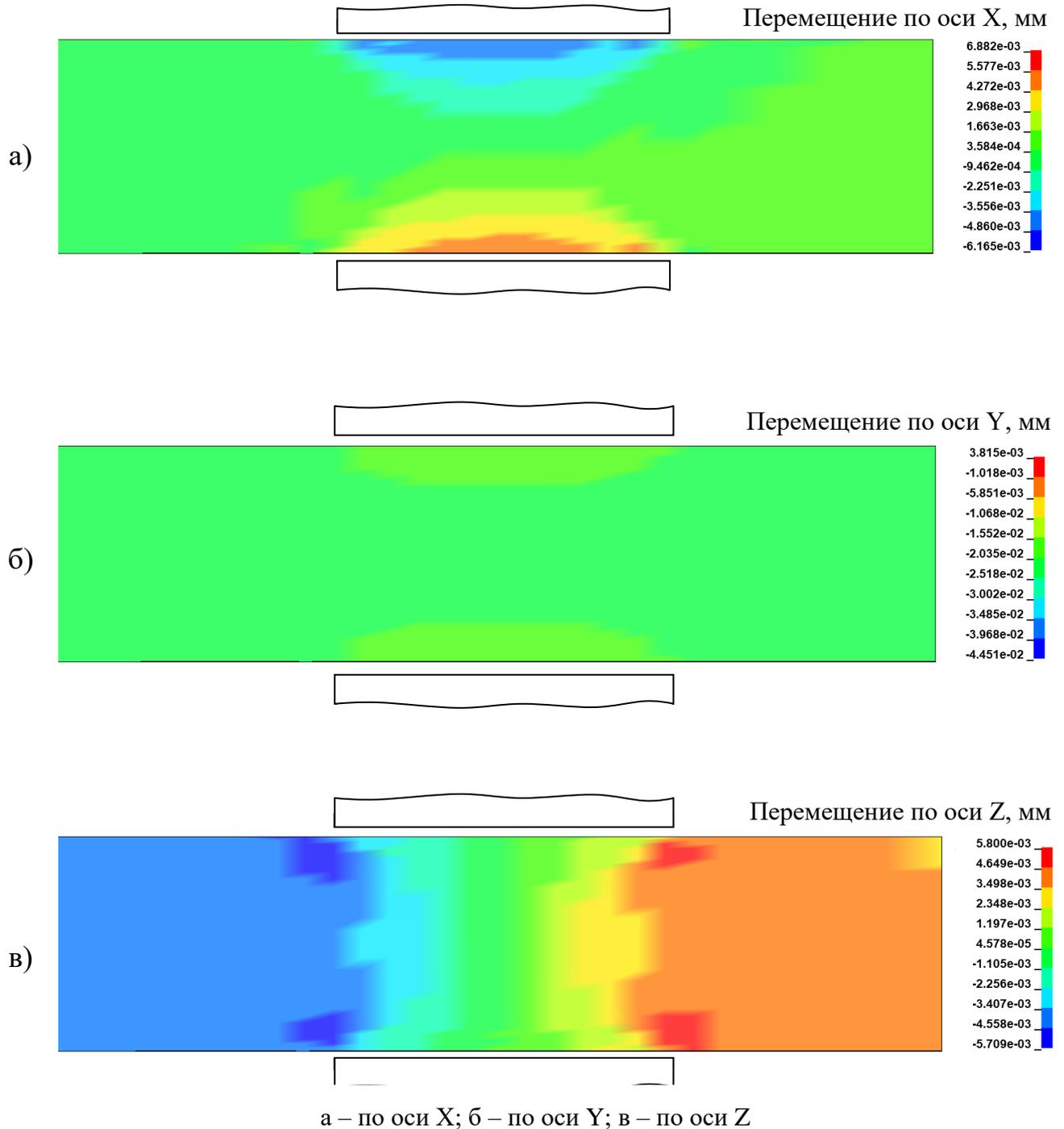


Рисунок 2.10 – Распределение перемещений после раскатки роликами диаметром 32 мм и шириной 6 мм (глубина внедрения 0,035 мм в центральной части пластины толщиной 4 мм из материала ВТ95пчТ2)

На рисунке 2.11 представлены изолинии, образовавшейся в результате раскатки роликами эквивалентной пластической деформации, которая представляет

собой накопленную необратимую деформацию в материале [103], является неотрицательной и монотонно увеличивается всякий раз, когда напряжение в материале превышает предел текучести.

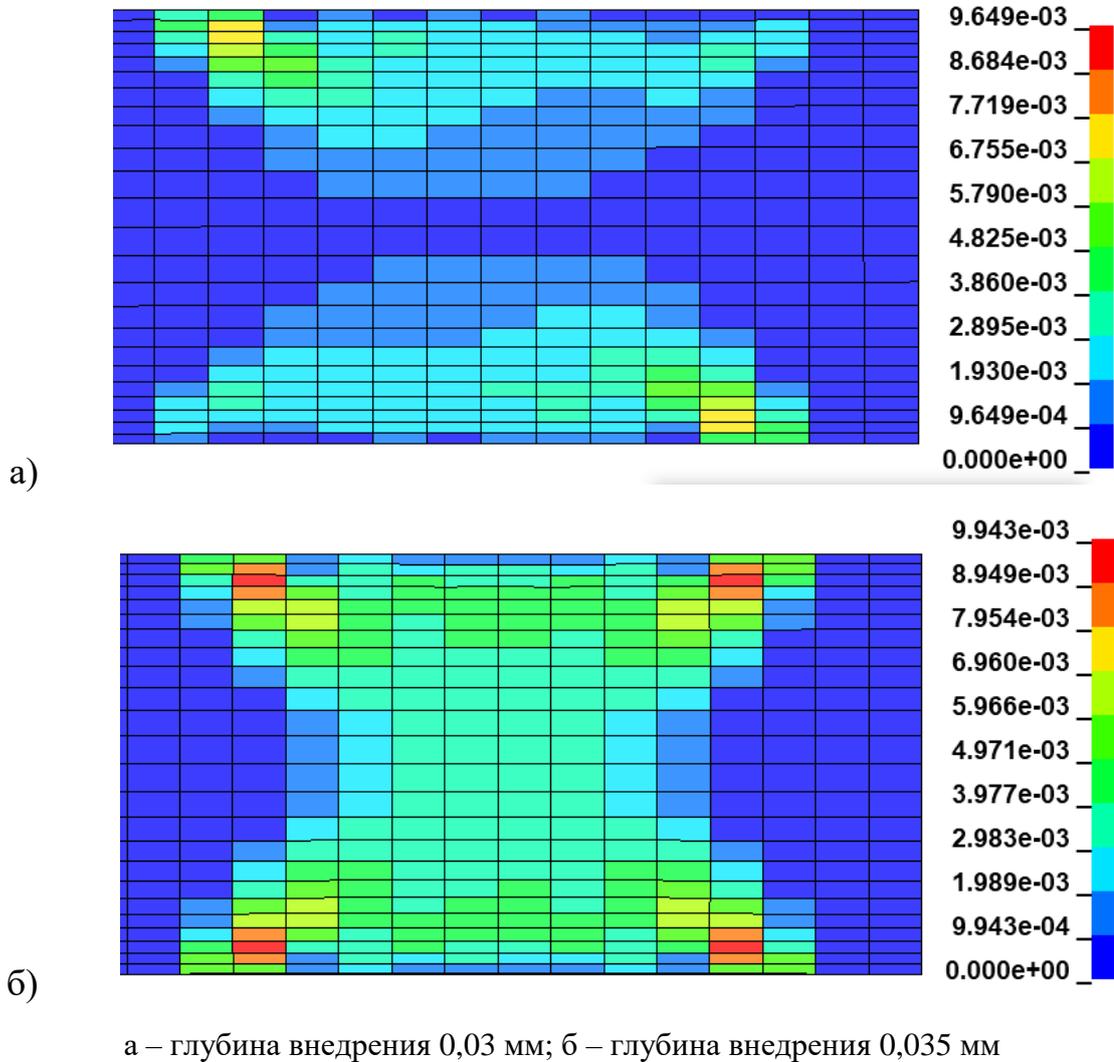


Рисунок 2.11 – Распределение эквивалентной пластической деформации после раскатки роликами диаметром 32 мм и шириной 6 мм по толщине (4 мм) пластины из материала ВТ95пчТ2

Эквивалентная пластическая деформация рассчитывается пошагово с использованием эквивалентной скорости пластической деформации по формуле:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \int_0^t \frac{2}{3} (\dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p)^{\frac{1}{2}} dt, \quad (2.4)$$

где t – время процесса деформирования;

$\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ – скорость пластической деформации,

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^e. \quad (2.5)$$

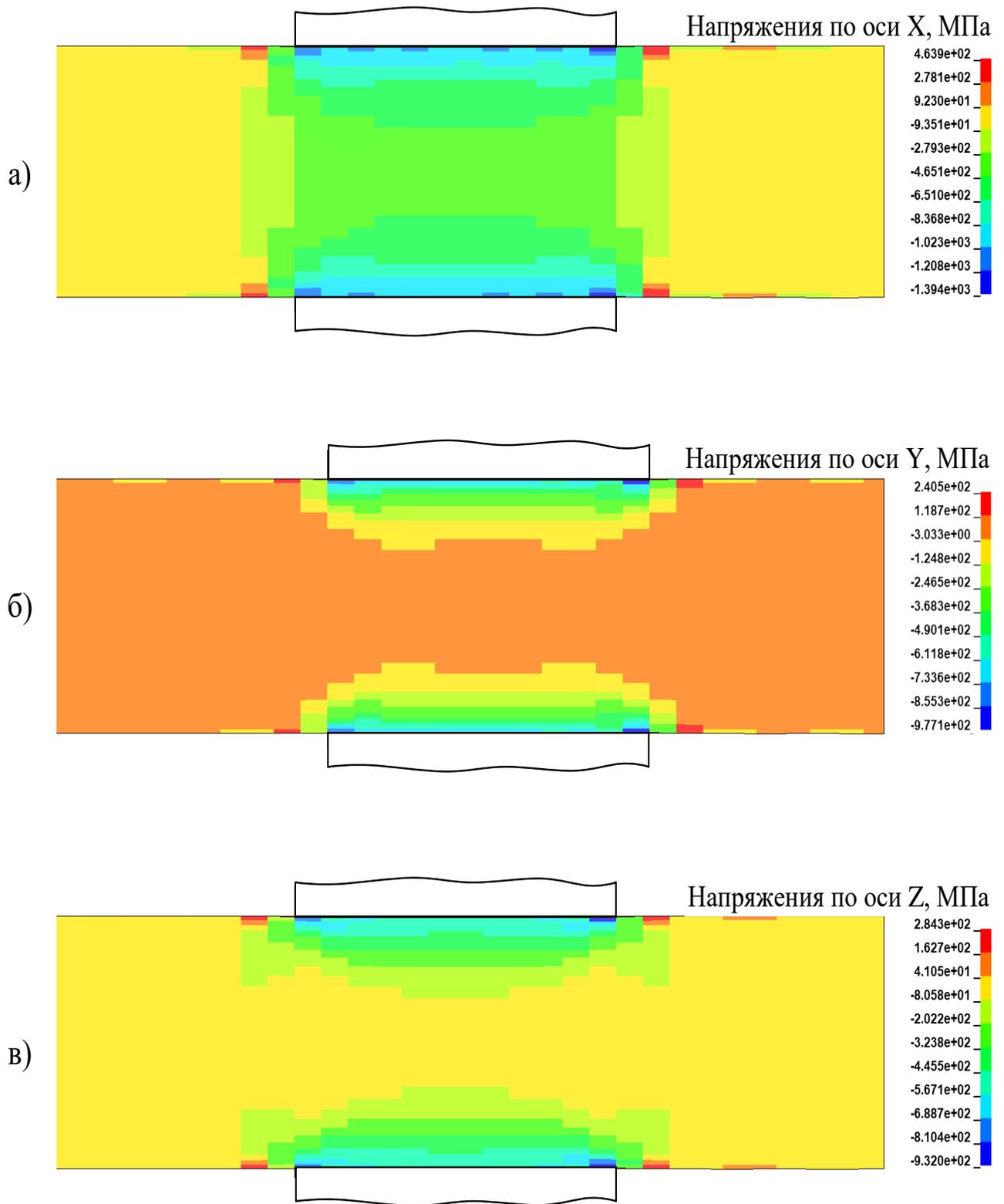
Здесь $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – полная скорость деформации;

$\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ – скорость упругой деформации.

Из рисунка 2.11 а, на котором показаны результаты внедрения роликов на глубину 0,03 мм, видно, что области пластического течения в зоне контакта с роликами имеют форму сегмента круга и распространяются на одинаковую глубину. На рисунке 2.11 б показаны результаты внедрения роликов на глубину 0,035 мм. С глубины внедрения роликов диаметром 32 мм и шириной 6 мм в пластину из материала ВТ95пчТ2 толщиной 4 мм область пластической деформации распространяется по всей толщине пластины.

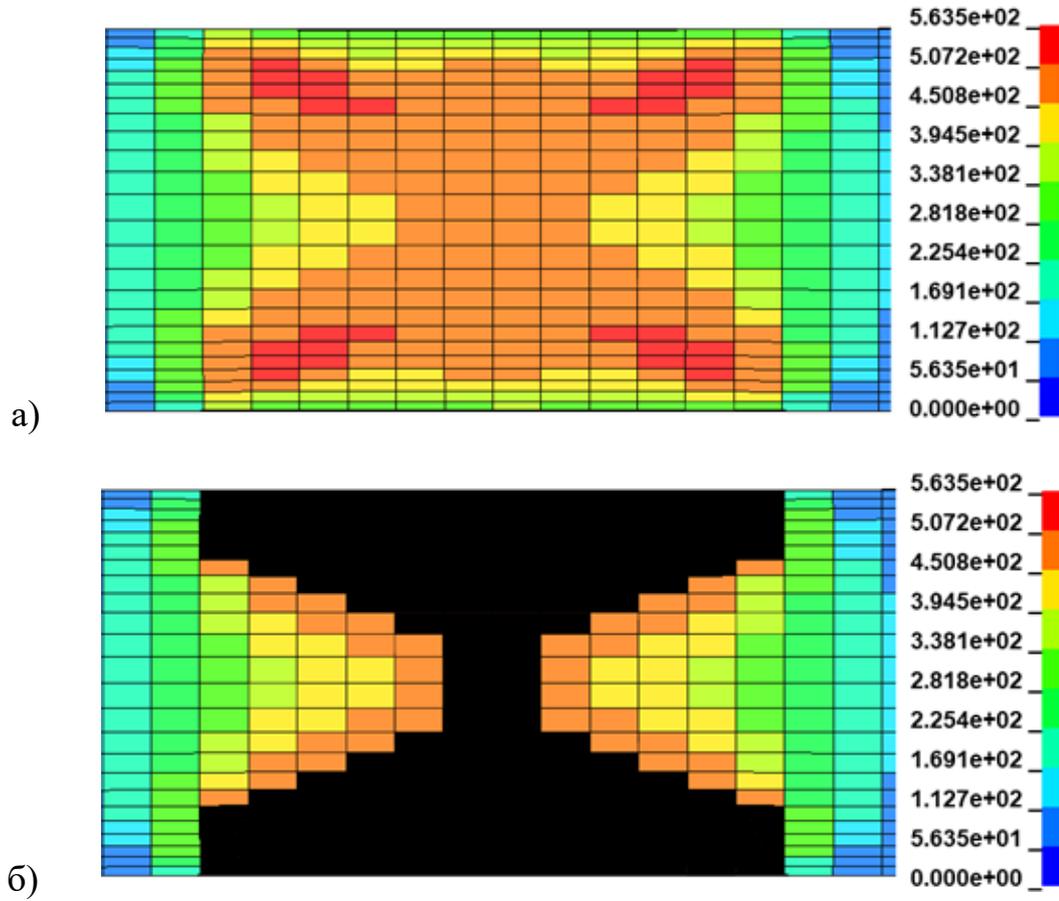
На рисунке 2.12 представлены изолинии напряжений, действующих по осям координат в процессе РР при глубине внедрения роликов 0,035 мм. Напряжения являются сжимающими как по оси контакта (ось X), так и в двух параллельных поверхностях пластины по направлениям осей Y и Z. При этом область распространения компоненты напряжений по оси X охватывает всю толщину пластины, а компоненты по осям Y и Z распространяются примерно на треть толщины.

Изолинии эквивалентных напряжений по Мизесу показаны на рисунке 2.13 а. На рисунке 2.13 б чёрным цветом выделена область пластической деформации, в которой напряжения превосходят предел текучести $\sigma_{02}=457$ МПа.



а) распределение по оси X; б) то же по оси Y; в) то же по оси Z

Рисунок 2.12 – Распределение напряжений в процессе раскатки роликами диаметром 32 мм и шириной 6 мм (глубина внедрения роликов 0,035 мм в пластине толщиной 4 мм из материала ВТ95пчТ2)



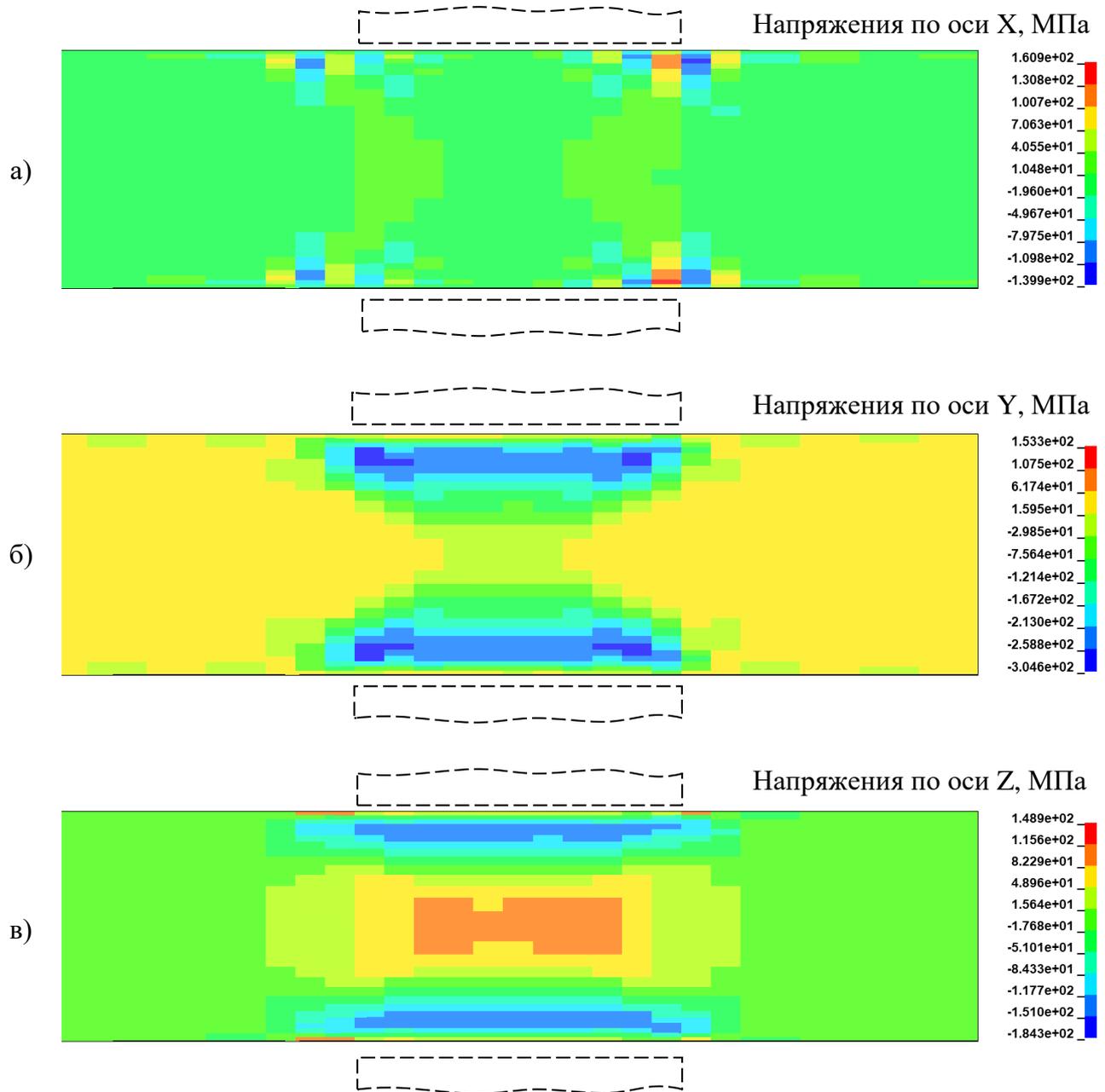
а – распределение эквивалентных напряжений по Мизесу;

б – то же с выделенной зоной (напряжения по Мизесу больше предела текучести)

Рисунок 2.13 – Распределение напряжений по Мизесу (МПа) в процессе раскатки роликами диаметром 32 мм и шириной 6 мм (глубина внедрения роликов 0,035 мм в пластине толщиной 4 мм из материала ВТ95пчТ2)

На рисунке 2.14 показаны изолинии компонент остаточных напряжений после раскатки роликами. Как видно, напряжения в направлении оси X после снятия нагрузки почти полностью релаксировали. При этом в направлениях, параллельных поверхности сформированы ОН. Наибольшую величину ОН имеют в направлении раскатки (по оси Y). Данная компонента ОН связана с результатами деформирования деталей при РР, поэтому в целях дальнейшей экспериментальной проверки результатов моделирования были построены эпюры средних значений

нормальных ОН в зоне деформации, ширину которой приняли равной ширине пластины (либо следа ролика), вдоль оси Y по толщине $\bar{\sigma}_{y(x)}$ и высоте пластины $\bar{\sigma}_{y(z)}$. Схема к построению данных эпюр приведена на рисунке 2.15.



а – распределение по оси X; б – то же по оси Y; в – то же по оси Z

Рисунок 2.14 – Распределение остаточных напряжений (МПа) после раскатки роликами диаметром 32 мм и шириной 6 мм (глубина внедрения роликов 0,035 мм в пластине толщиной 4 мм из материала ВТ95пчТ2)

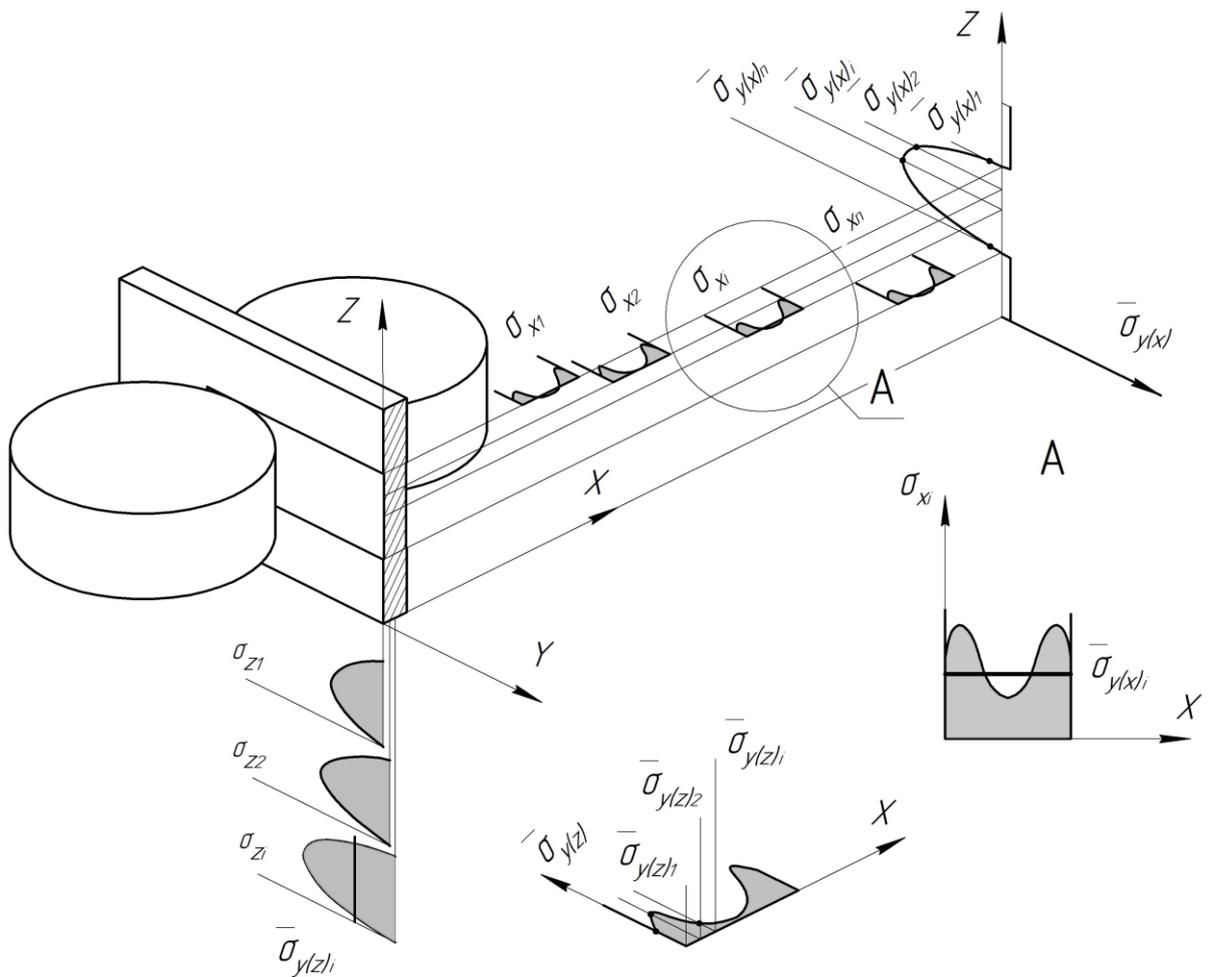


Рисунок 2.15 – Схема к определению средних значений остаточных напряжений в зоне раскатки роликами

В сечении пластины для каждого вертикального ряда узлов сетки конечных элементов построим эпюры ОН $\sigma_{x1}, \sigma_{x2} \dots \sigma_{xi} \dots \sigma_{xn}$. Для каждой эпюры определим среднее значение $\bar{\sigma}_{y(x)i}$; для этого вычислим площадь эпюры и разделим на ширину зоны ролика:

$$\bar{\sigma}_{y(x)i} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{i,j} + \sigma_{i+1,j}}{2} b_{i,i+1,j}}{h_{зр}}, \quad (2.6)$$

где i – номер узла сетки по оси z ;

j – номер узла сетки по оси x ;

$b_{i,i+1,j}$ – расстояние между соседними узлами сетки;

$\sigma_{i,j}$ – напряжение в указанном узле сетки;

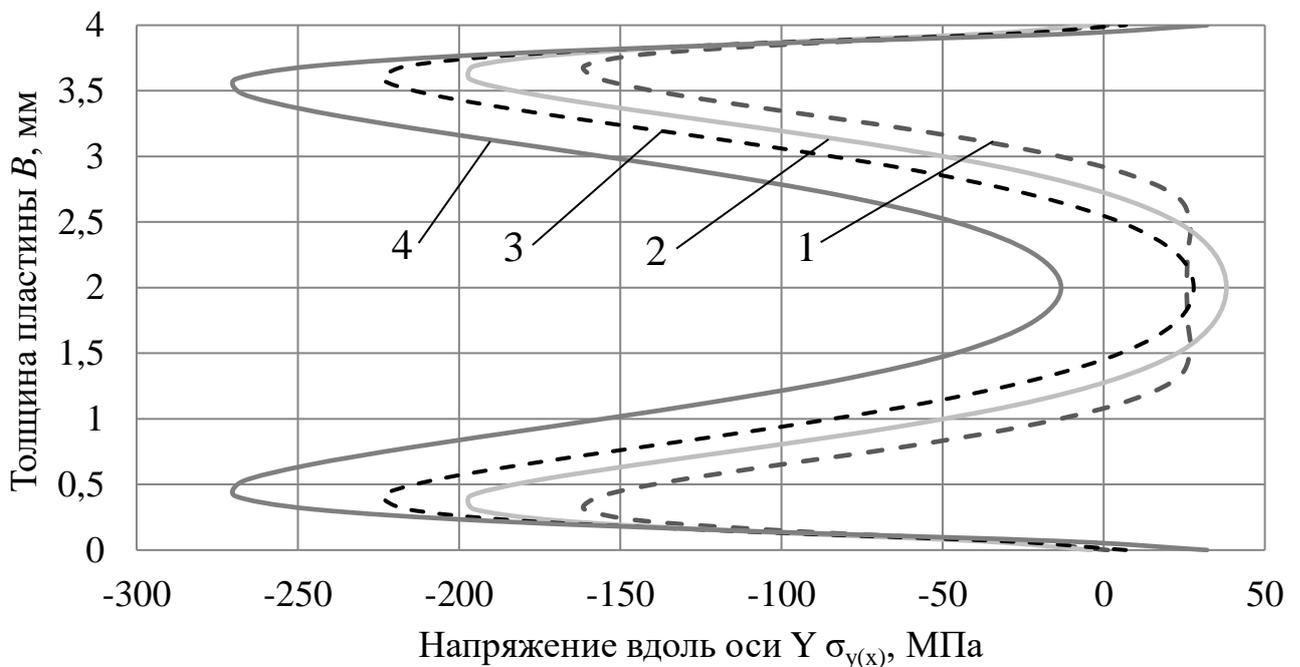
$h_{зр}$ – ширина зоны раскатки (ширина ролика 6 мм).

Построение эпюры остаточных напряжений, действующих вдоль оси Y , по высоте пластины выполняется аналогичным образом. Средние напряжения в точках эпюры рассчитываются по формуле:

$$\bar{\sigma}_{y(z)_i} = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\sigma_{i,j} + \sigma_{i,j+1}}{2} b_{i,j,j+1}}{b_{пл}}, \quad (2.7)$$

где $b_{пл}$ – толщина пластины; $b_{пл} = 4$ мм. $\bar{\sigma}_{y(x)}$

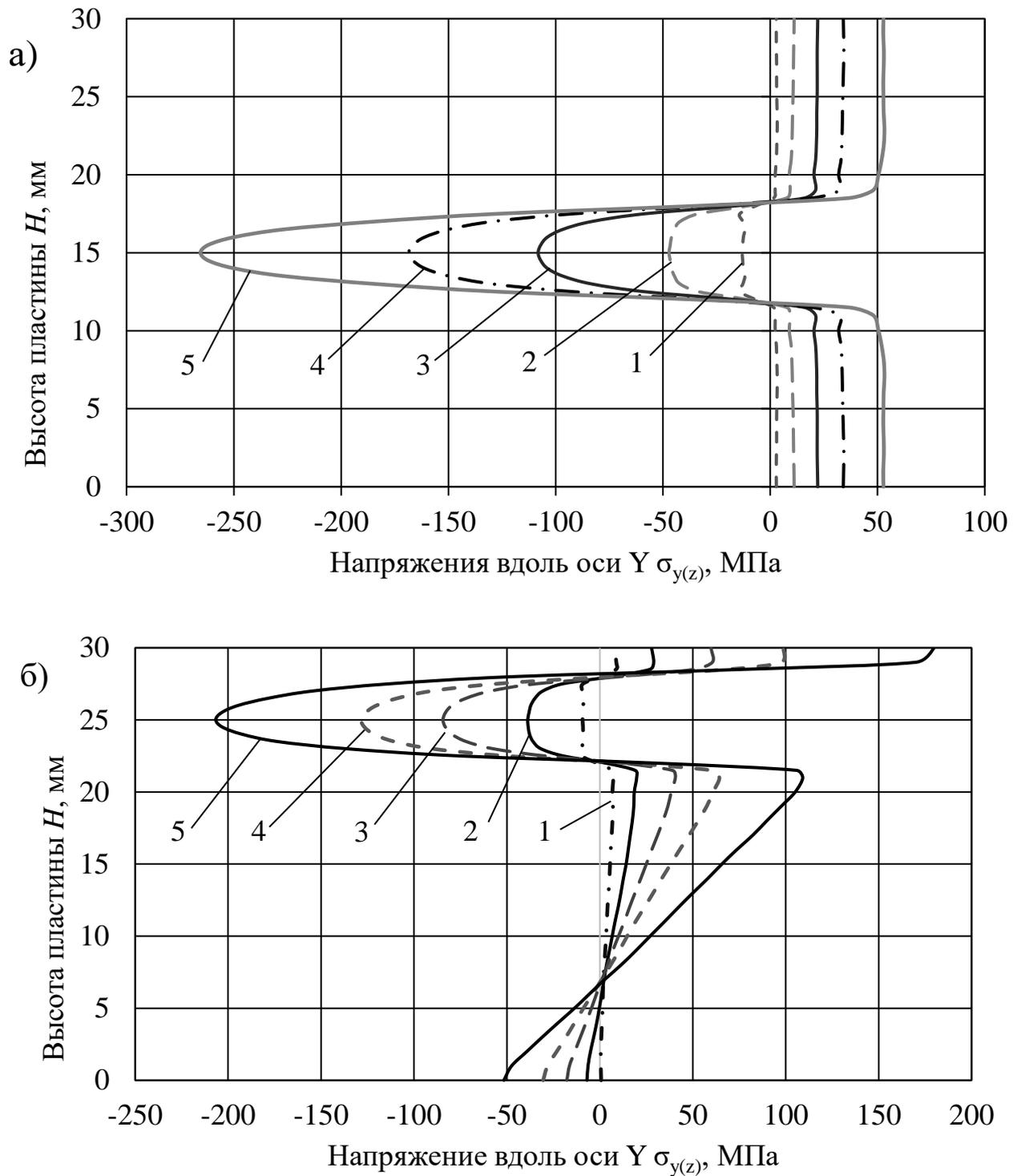
На рисунке 2.16 приведены эпюры средних значений остаточных напряжений по глубине материала после раскатки при различной глубине внедрения роликов в пластину толщиной 4 мм.



1 – глубина внедрения роликов 0,03 мм; 2 – глубина внедрения роликов 0,0325 мм;
3 – глубина внедрения роликов 0,035 мм; 4 – глубина внедрения роликов 0,04 мм

Рисунок 2.16 – Эпюры средних значений остаточных напряжений (вдоль оси Y) после раскатки роликами диаметром 32 мм и шириной 6 мм в пластине толщиной 4 мм из материала ВТ95пчТ2

На рисунке 2.17 представлены эпюры средних значений остаточных напряжений по высоте пластины после раскатки при внедрении роликов по центру и с краю пластины.



а – обработка по центру пластины; б – обработка с краю пластины

1 – глубина внедрения роликов 0,025 мм; 2 – глубина внедрения роликов 0,03 мм;

3 – глубина внедрения роликов 0,035 мм; 4 – глубина внедрения роликов 0,04 мм;

5 – глубина внедрения роликов 0,05 мм

Рисунок 2.17 – Эпюры средних значений остаточных напряжений (вдоль оси Y) по высоте пластины толщиной 4 мм из материала ВТ95пчТ2 после раскатки роликами диаметром 32 мм и шириной 6 мм

Как видно из рисунков 2.16, 2.17, процесс РР приводит к образованию в обработанной детали ОН сжатия, благоприятных по влиянию на ресурсные характеристики материала.

Анализ эпюр распределения остаточных напряжений (вдоль оси Y) выявил различный характер НДС в зависимости от области обработки. Так, обработка в центре пластины (см. рисунок 2.17, а) приводит к её общему удлинению, интенсивность которого прямо пропорциональна глубине внедрения роликов. В то же время обработка у края (см. рисунок 2.17, б) вызывает преимущественно изгиб. Возникающая картина остаточных напряжений соответствует распределению, представленному на рисунке 2.18.

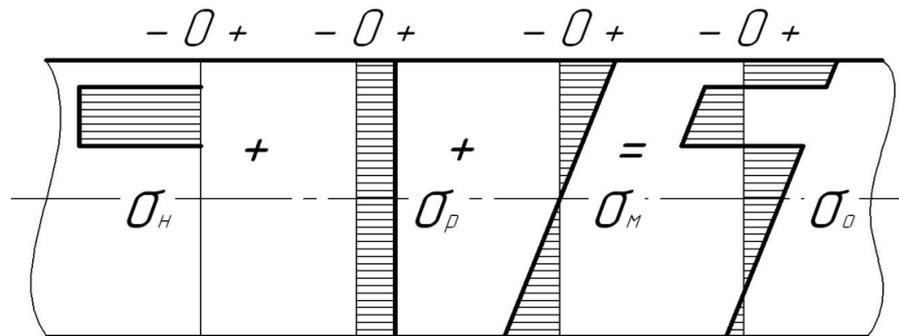


Рисунок 2.18 – Схема образования ОН по высоте пластины после раскатки роликами

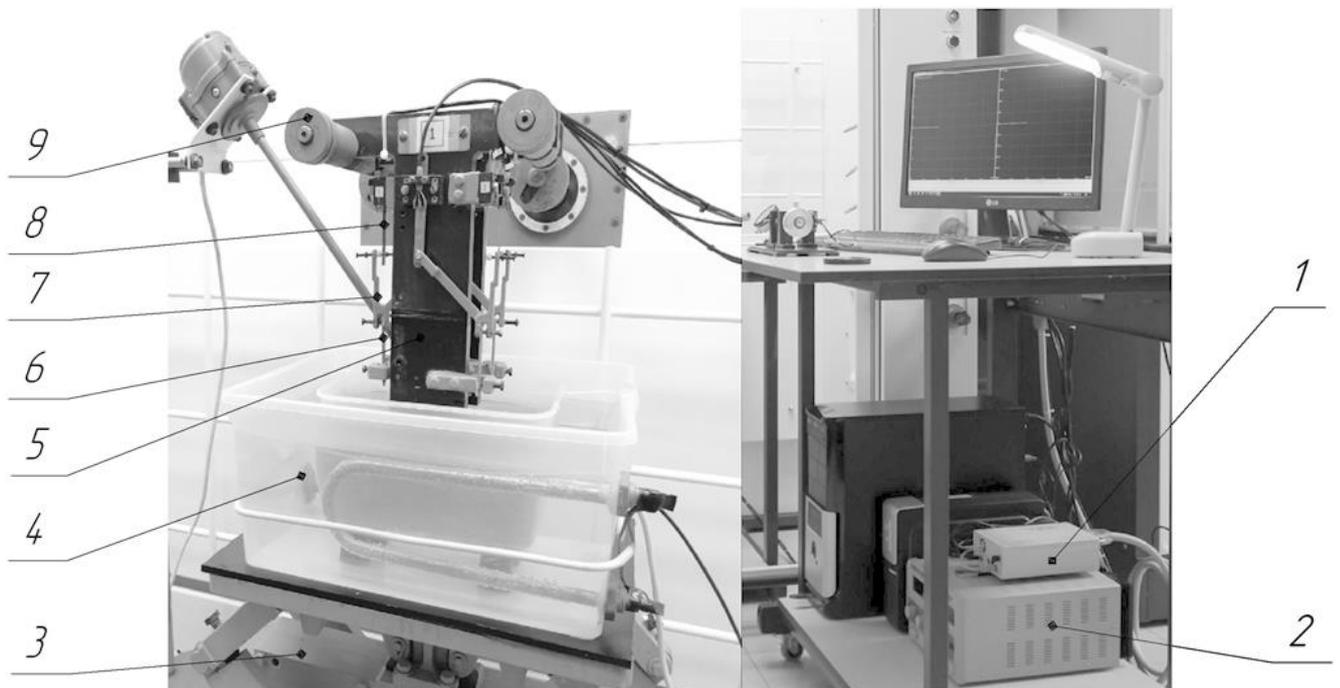
Для описания и расчёта НДС при поверхностном пластическом деформировании (включая дробеударную обработку) широко применяется принцип суперпозиции [54]. Согласно этому принципу, результирующая эпюра остаточных напряжений σ_0 может быть определена как алгебраическая сумма эпюр начальных напряжений σ_H , а также напряжений от действия эквивалентных осевой силы σ_p и изгибающего момента σ_M (1.12).

Наблюдаемое при таком нагружении смещение нейтрального слоя характерно для классической задачи внецентренного растяжения брусьев [21]. Ключевым является совпадение распределения остаточных напряжений после раскатки роликами с распределением, создаваемым статической растягивающей силой, при-

ложенной к центру отпечатка. Данное соответствие служит прямым подтверждением корректности методики расчёта формоизменения, основанной на процессе нагружения эквивалентной силой.

2.3.2 Проверка достоверности конечно-элементной модели раскатки роликами.

Для проверки достоверности разработанной КЭМ процесса РР было проведено сравнение эпюр ОН, полученных моделированием и определённых при исследовании образцов механическим методом (метод полосок Н.Н. Давиденкова [19, 20]) с использованием установка для измерения остаточных напряжений (УДИОН) [62] (рисунок 2.19).



- 1 – система сбора данных, построенная на тензометрических модулях; 2 – блок питания;
 3 – устройство для подъема ванн; 4 – термостатирующая ванна и ванна с травящим раствором;
 5 – приспособление для закрепления образцов; 6 – исследуемый образец; 7 – рычаг; 8 –
 пластины с тензодатчиком; 9 – кронштейн

Рисунок 2.19 – Установка для измерения остаточных напряжений методом послойного удаления слоев (УДИОН-2)

Порядок исследования:

1. Изготовили сборные образцы из материала В95пчТ2, состоящие из двух пластин 30x250x4 мм, скрепленных болтами (рисунок 2.20). Образцы подвергли обработке на раскатной установке с режимами, подобранными таким образом, чтобы при раскатке роликами и моделировании этого процесса по описанной выше методике возникали одинаковые деформации изгиба (таблица 2.5).

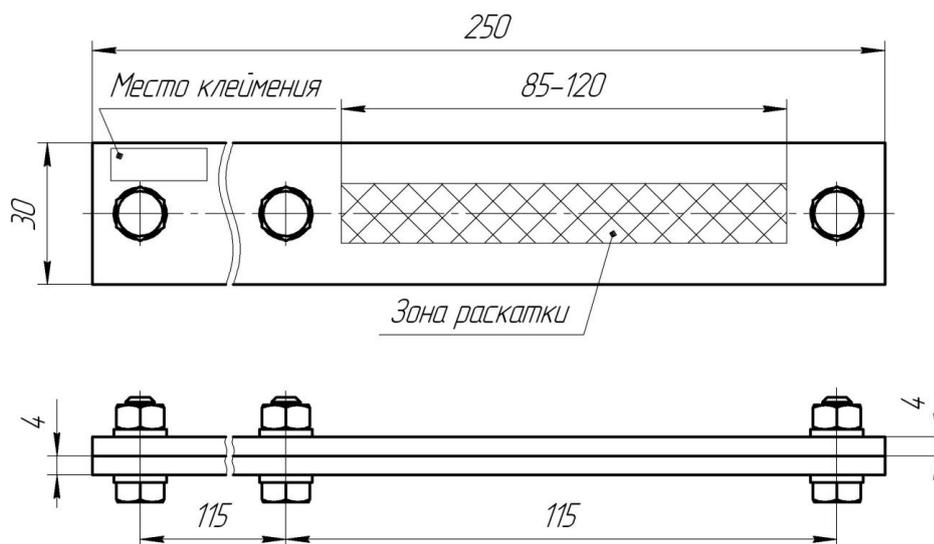


Рисунок 2.20 – Сборный образец для определения ОН

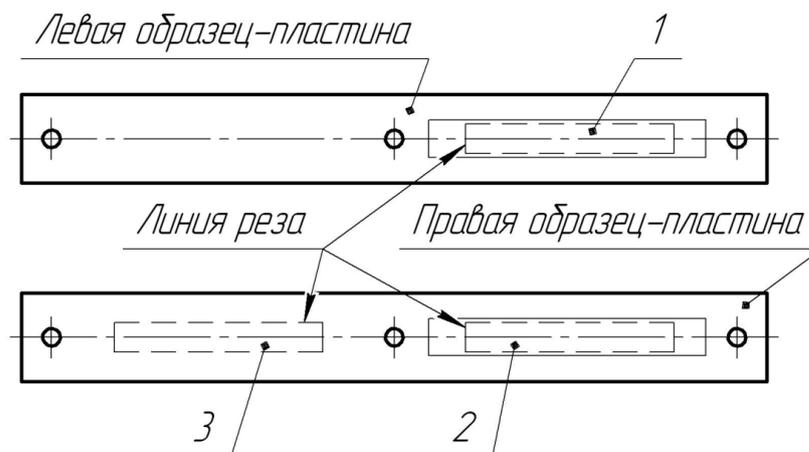
Таблица 2.5 – Таблица соответствия режимов УФП-1 и глубины внедрения роликов при моделировании

| Давление в гидросистеме сжатия роликов, МПа | Глубина внедрения роликов при моделировании, мм |
|---|---|
| 4,66 | 0,025 |
| 7,93 | 0,03 |
| 8,66 | 0,325 |
| 9,37 | 0,35 |
| 10,77 | 0,4 |
| 13,72 | 0,5 |

2. Из обработанных образцов с помощью отрезного станка вырезали три образца-полоски размерами 60x8 мм (рисунок 2.21). Полученные образцы-полоски подвергали слесарной обработке: снятию заусенцев и скруглению острых кромок. Маркировку образцов осуществляли на необработанной стороне.

3. Произвели измерение образцов-полосок: габаритных размеров с помощью микрометра; стрелы прогиба – индикатором часового типа, массы – при помощи

лабораторных весов с точностью до 0,002 г. Полученные данные вносили в специализированное программное обеспечение УДИОН-2 [78].

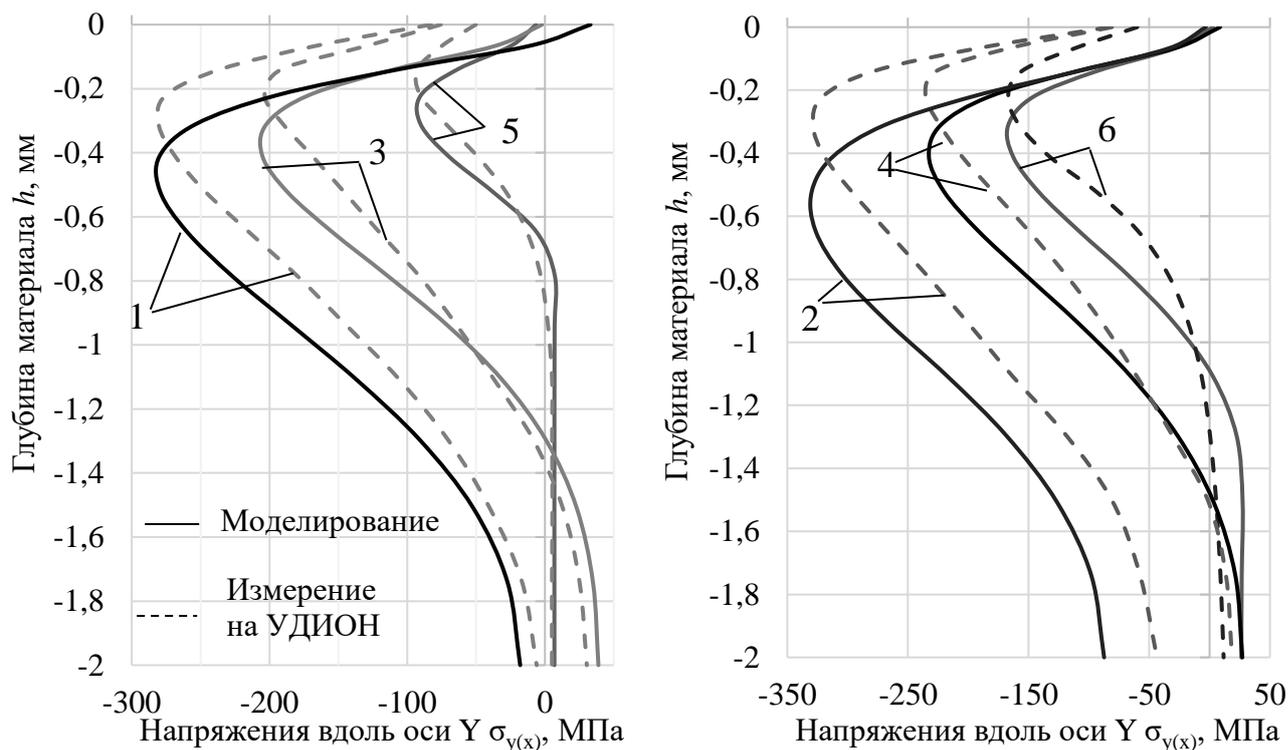


1 – первый образец-полоска; 2 – второй образец-полоска; 3 – третий образец-полоска

Рисунок 2.21 – Схема выреза образцов-полосок из сборных пластин

4. Образцы-полоски покрыли защитным раствором КЧ-7101ВВ.
5. Образцы-полоски (4 штуки) в вертикальном положении монтировали в приспособление для закрепления образцов, представляющее собой Т-образную рамку (см. рисунок 2.19). К верхней части образцов-полосок крепили рычаг, предназначенный для передачи деформации на тензометрический датчик.
6. Образцы с рамками покрывали защитной парафиновой пленкой. С изучаемой поверхности образцов-полосок удаляли защитный слой.
7. Приспособление с образцами помещали в вытяжной шкаф установки УДИОН-2 над ванной. По окончании подготовительных операций образцы-полоски погружали в ванну с химическим раствором для травления.
8. В процессе послойного химического травления материала образец деформируется. Деформация фиксируется измерительными тензодатчиками с помощью рычагов; результаты записываются в режиме реального времени. Рычаги выполняют функцию передачи и усиления деформации.
9. После завершения процесса травления образцы-полоски демонтировали из рамок. Защитный слой с поверхности образцов-полосок удаляли и повторяли измерения, описанные в п. 3.

Расчет остаточных напряжений в образцах осуществляли с помощью программного обеспечения, разработанного в ИРНТУ [78]. В результате построены эпюры распределения остаточных напряжений по глубине материала. На рисунке 2.22 представлено сравнение эпюр, полученных методом конечных элементов и экспериментально на УДИОН-2.



- 1 – глубина внедрения роликов 0,05 мм; 2 – глубина внедрения роликов 0,04 мм;
 3 – глубина внедрения роликов 0,035 мм; 4 – глубина внедрения роликов 0,0325 мм;
 5 – глубина внедрения роликов 0,03 мм; 6 – глубина внедрения роликов 0,025 мм

Рисунок 2.22 – Эпюры ОН, полученные моделированием и определением на УДИОН-2 после раскатки роликами диаметром 32 мм и шириной 6 мм в пластине толщиной 4 мм из материала ВТ95пчТ2 с различной глубиной внедрения роликов

В результате сравнения эпюр, полученных моделированием и определением на УДИОН-2, были выявлены отклонения в пределах 5 % в основной части эпюр и до 24 % – на поверхности, что, очевидно обусловлено влиянием трения.

Следует отметить, что при моделировании не учитывались технологические остаточные напряжения, присутствующие в заготовке. Тем не менее, результаты

сравнения подтверждают корректность численного конечно-элементного моделирования процесса раскатки роликами в программе LS-DYNA.

2.3.3 Оценка применимости расчётных моделей.

Радиус кривизны R деформированных моделей пластин был определен с помощью штатных средств программы LS-Prepost по значениям координат по оси Z трёх узлов, расположенных на расстоянии 25; 125; 225 мм от края пластины. Значение стрелы прогиба f на базе $a = 200$ мм рассчитали по формуле (2.2).

$$f = \frac{a^2}{8R}. \quad (2.8)$$

Эквивалентная растягивающая сила P связана со значением f формулой (1.8) [46]. После преобразования, связанного с переносом начала координат в центр тяжести сечения пластины, выражение принимает вид:

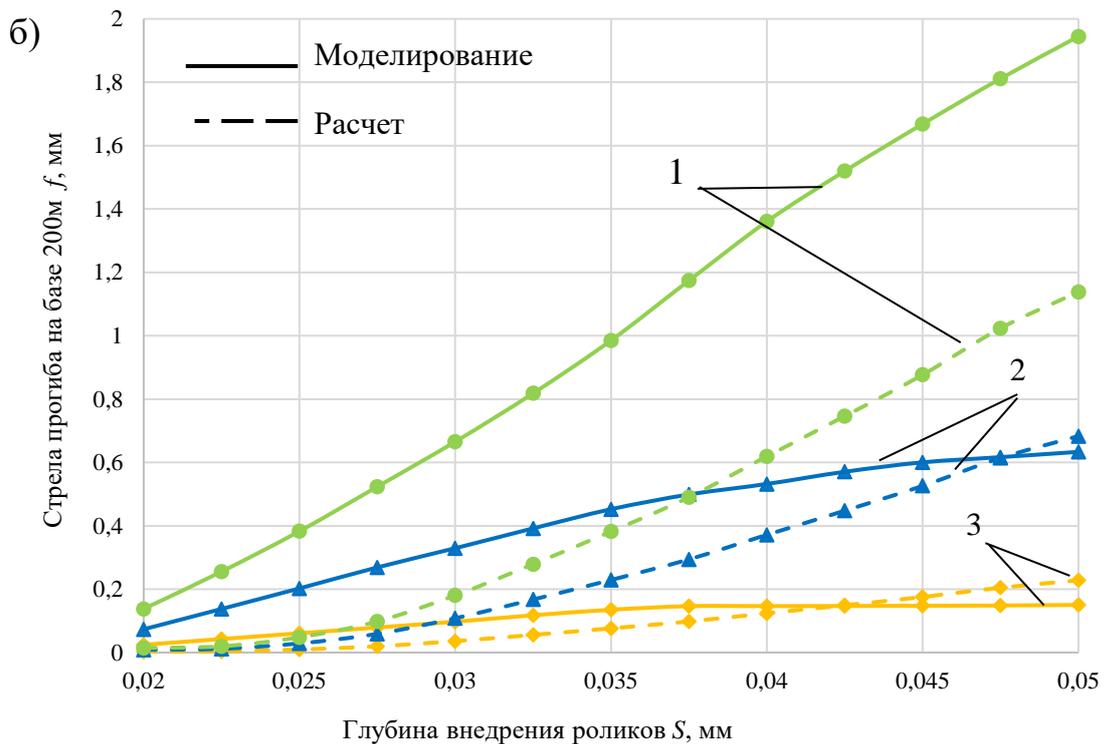
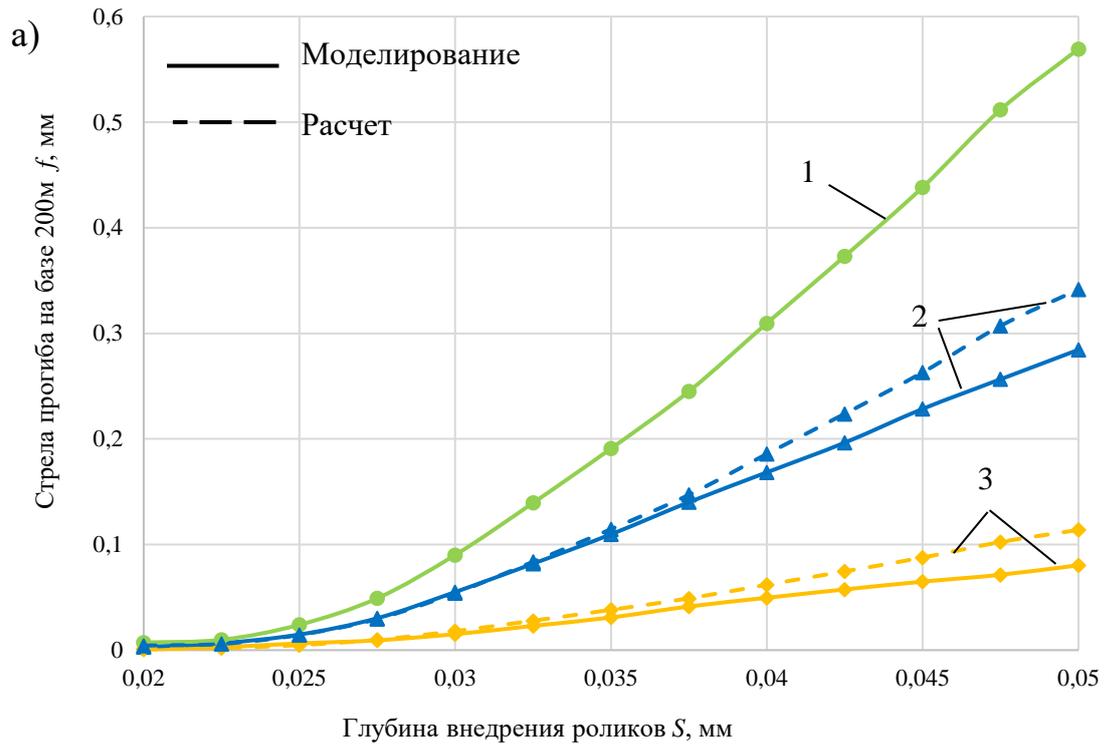
$$P = \frac{2 E f B H^3}{3 z_c a^2}, \quad (2.9)$$

где z_c – расстояние от середины ширины роликов до центра тяжести сечения.

По формуле (2.3) рассчитаны значения силы P в зависимости от глубины внедрения в пластину толщиной $B = 4$ мм роликов диаметром 32 мм, шириной 6 мм. Центр ширины роликов расположен на расстоянии $z_c = 10$ мм от центра тяжести сечения пластины. Используем полученные результаты расчёта силы P для вычисления стрел прогиба пластин с разными значениями B и z_c по формуле:

$$f = \frac{3 P z_c a^2}{2 E B H^3}. \quad (2.10)$$

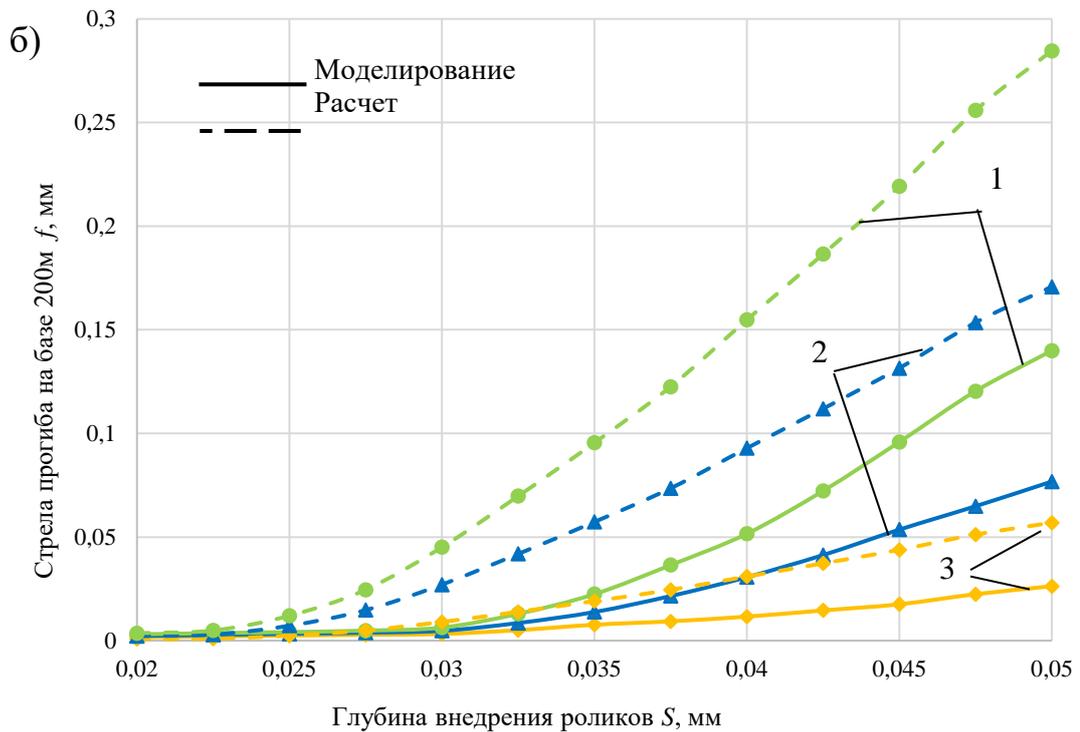
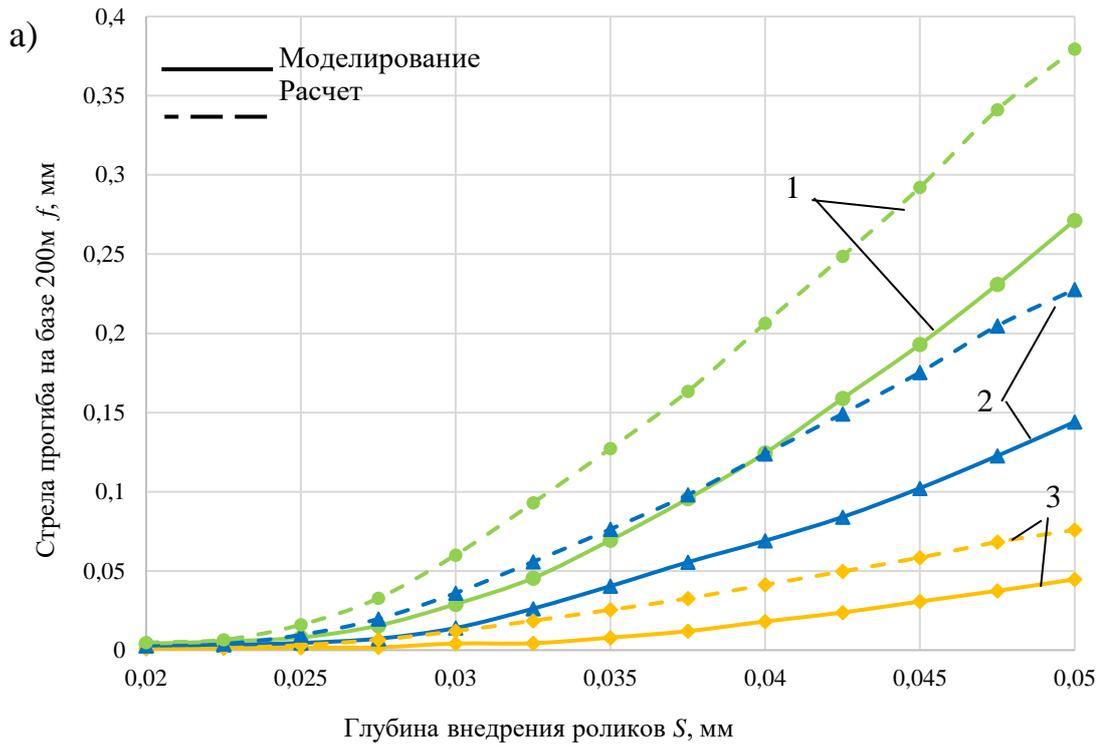
На рисунках 2.23; 2.24 приведены зависимости стрел прогиба на базе 200 мм пластин от глубины внедрения роликов, полученные конечно-элементным моделированием, а также расчётом по формуле (2.4) с подстановкой сил P , определённых по результатам моделирования раскатки роликами пластины толщиной $B = 4$ мм.



а – толщина образца 4 мм; б – толщина образца 2 мм;

1 – расстояние 10 мм; 2 – расстояние 6 мм; 3 – расстояние 2 мм

Рисунок 2.23 – Зависимость стрелы прогиба образцов с различной толщиной от глубины внедрения роликов диаметром 32 мм, шириной 6 мм на разном расстоянии от центра тяжести сечения пластины



а – толщина образца 6 мм; б – толщина образца 8 мм;

1 – расстояние 10 мм; 2 – расстояние 6 мм; 3 – расстояние 2 мм

Рисунок 2.24 – Зависимость стрелы прогиба образцов с различной толщиной от глубины внедрения роликов диаметром 32 мм, шириной 6 мм на разном расстоянии от центра тяжести сечения пластины

Из графиков, приведённых на рисунках 2.23; 2.24, видно, что результаты расчётов и моделирования для пластин, у которых толщины B и координаты z_c роликов при обработке отличаются от пластин с параметрами $B = 4$ мм, $z_c = 10$ мм, использованных при определении эквивалентных растягивающих сил P , имеют значительные отклонения (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Относительное отклонение величины прогиба, рассчитанной аналитически и полученной в результате конечно-элементного моделирования, для пластин с разной толщиной

Относительного отклонения в процентах

| Толщина пластины B , мм | Расстояние z_c от центра роликов до центра тяжести сечения пластины, мм | | |
|------------------------------|---|-----|-----|
| | 2 | 6 | 10 |
| 2 | 236 | 259 | 339 |
| 4 | 26 | 10 | 0 |
| 6 | 51 | 42 | 38 |
| 8 | 63 | 58 | 61 |

Таким образом, применение методики расчёта формоизменения деталей при РР, основанной на нагружении рёбер эквивалентной растягивающей силой [46-49], возможно только при полном геометрическом подобии процессов обработки технологических образцов и реальных деталей при моделировании и выполнении аналитических расчётов.

2.4 Оценка взаимовлияния соседних рёбер при их последовательной обработке

Поскольку в результате РР происходит удлинение рёбер панели, и детали в целом, представляет интерес определение взаимовлияния соседних рёбер при их последовательной обработке. Для этого было выполнено конечно-элементное моделирование в системе LS-DYNA процесса нагружения образцов одинаковой

длины (содержащих одно и два ребра) растягивающими силами [46-49], приложенными на расстоянии 10 мм от вершины ребра согласно схеме, показанной на рисунке 2.25.

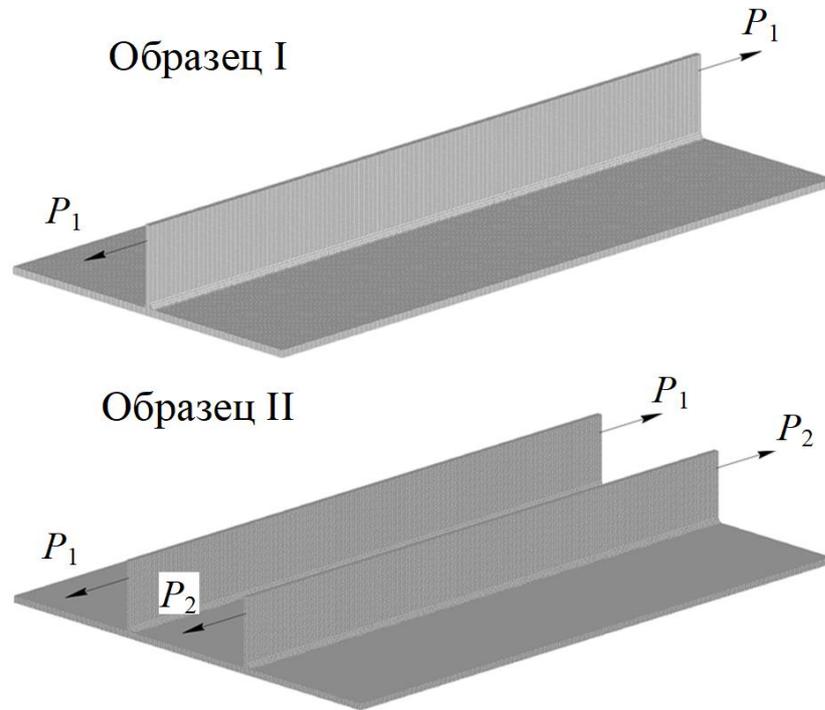


Рисунок 2.25 – Схемы нагружения при исследовании взаимовлияния соседних рёбер при их последовательной раскатке роликами

Модель материала и другие параметры моделирования примем такими же, как в п. 2.1 (шаг сетки 1 мм). Габаритные размеры модели образца I – 500x244x50 мм, толщины полотна и ребра – 4 мм, количество элементов – 235 600, узлов – 294 063. Габаритные размеры модели образца II – 500x368x50 мм, высота рёбер – 50 мм, расстояние между ребрами – 120 мм, расстояние между ребром и краем основания – 120 мм, толщина полотна и ребра 4 мм, количество элементов 375 200, узлов – 466 521. Закрепление модели – с двух сторон за нижние ребра полотна. Одно ребро полотна имеет возможность вращаться относительно оси X, противоположное ребро имеет фиксацию по оси Z.

Растягивающие силы P (см. рисунок 2.25) представляют собой интегральное значение удельного растягивающего усилия q , эквивалентного воздействию роликов на ребро образца, прикладываемого к узлам сетки моделей (рисунок 2.26). Кривая нарастания удельного растягивающего усилия q представлена на рисунке 2.27.

Участки с постоянной нагрузкой необходимы для стабилизации напряженного состояния, исключая случаи потери устойчивости и возникновения колебаний.

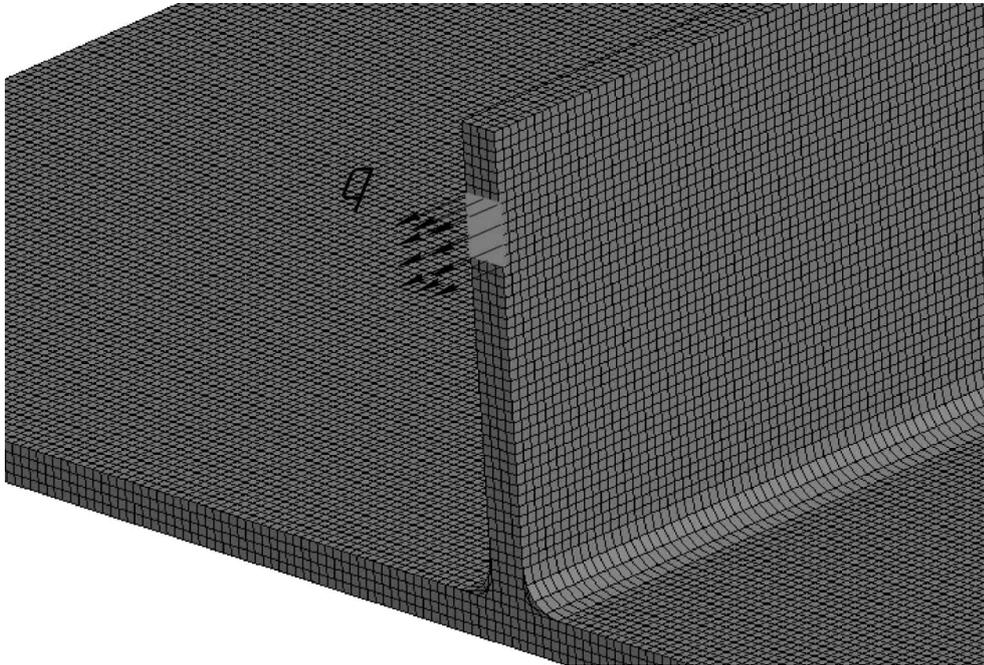


Рисунок 2.26 – Приложение распределённой растягивающей нагрузки к ребру образца

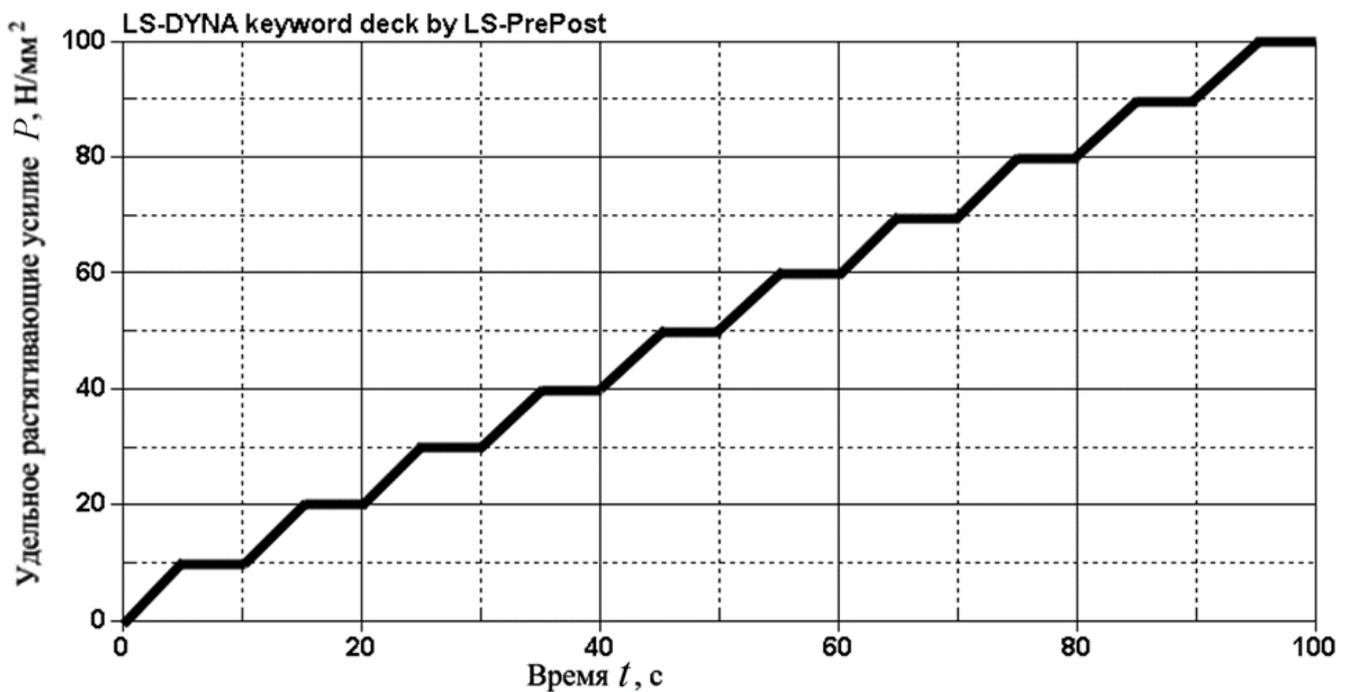


Рисунок 2.27 – Кривая нарастания удельного усилия с участками постоянной нагрузки

Степень влияния 2-го ребра при нагружении с изменением значений растягивающей силы F_2 определяется коэффициентом взаимовлияния рёбер,

$$k = f_I / f_{II}^{(1)}, \quad (2.11)$$

где f_I – стрела прогиба по оси ребра образца I;

$f_{II}^{(1)}$ – стрела прогиба по оси ребра 1 образца II.

При моделировании использовались значения растягивающих сил F_1 в диапазоне 200 – 45 000 Н. Значения растягивающих сил F_2 определим соотношением F_2/F_1 в диапазоне 0,20 – 5,00.

В результате моделирования (рисунок 2.28) были определены стрелы прогибов образцов как максимальное перемещение узлов полотна по оси Z (см. приложение А, таблицы 1-3).

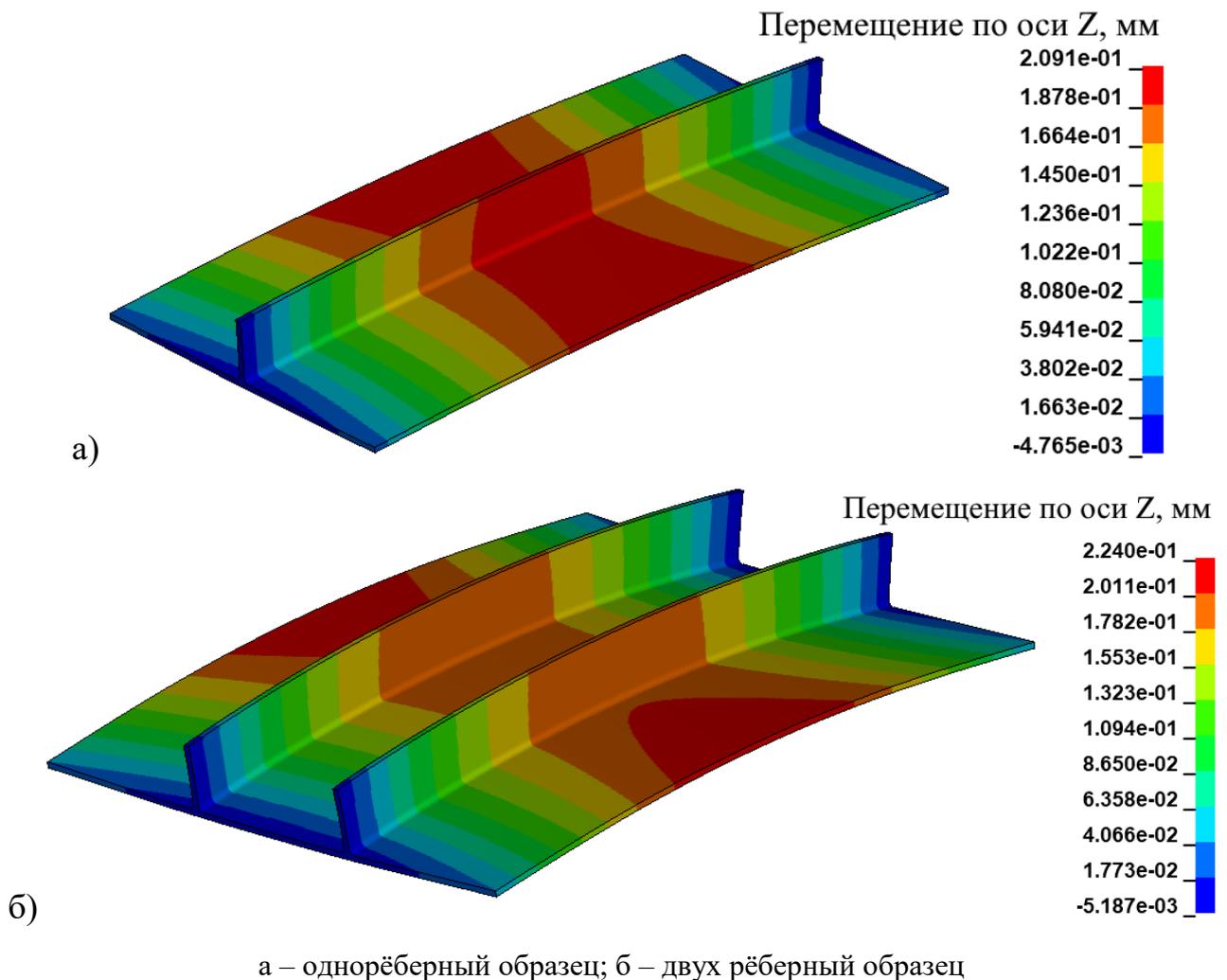


Рисунок 2.28 – Результат моделирования процесса нагружения образцов растягивающими силами

В таблице 2.7 приведены средние значения коэффициента k взаимовлияния рёбер и соотношения деформаций рёбер образца II, а также значения стандартного отклонения коэффициента взаимовлияния:

$$sd_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (k_i - \bar{k})^2}. \quad (2.12)$$

где \bar{k} – среднее арифметическое группы;

k_i – значение i элемента в группе;

n – количество элементов в группе.

Таблица 2.7 – Сводная таблица расчётных параметров

| Соотношение сил F_2/F_1 | Среднее соотношение деформаций рёбер образца II | Коэффициент взаимовлияния k | Стандартное отклонение коэффициента взаимовлияния | Количество измерений в группе |
|---------------------------|---|-------------------------------|---|-------------------------------|
| 0,20 | 0,24 | 0,968 | 0,0007 | 8 |
| 0,25 | 0,30 | 0,970 | 0,0025 | 8 |
| 0,33 | 0,38 | 0,975 | 0,0006 | 8 |
| 0,50 | 0,54 | 0,984 | 0,0011 | 8 |
| 0,67 | 0,70 | 0,993 | 0,0010 | 8 |
| 0,80 | 0,82 | 0,999 | 0,0009 | 8 |
| 0,83 | 0,85 | 1,001 | 0,0010 | 8 |
| 0,90 | 0,91 | 1,005 | 0,0008 | 8 |
| 0,91 | 0,92 | 1,005 | 0,0009 | 8 |
| 1,00 | 1,00 | 1,010 | 0,0008 | 8 |
| 1,10 | 1,09 | 1,015 | 0,0012 | 8 |
| 1,11 | 1,10 | 1,016 | 0,0010 | 8 |
| 1,20 | 1,18 | 1,020 | 0,0007 | 8 |
| 1,25 | 1,22 | 1,023 | 0,0009 | 8 |
| 1,50 | 1,44 | 1,036 | 0,0009 | 8 |
| 2,00 | 1,85 | 1,063 | 0,0010 | 8 |
| 3,00 | 2,62 | 1,115 | 0,0006 | 8 |
| 4,00 | 3,32 | 1,168 | 0,0004 | 8 |
| 5,00 | 4,44 | 1,219 | 0,0067 | 8 |

На рисунке 2.29 представлен график зависимости коэффициента k взаимовлияния рёбер от соотношения стрел прогиба рёбер образца II при их последовательной раскатке роликами.

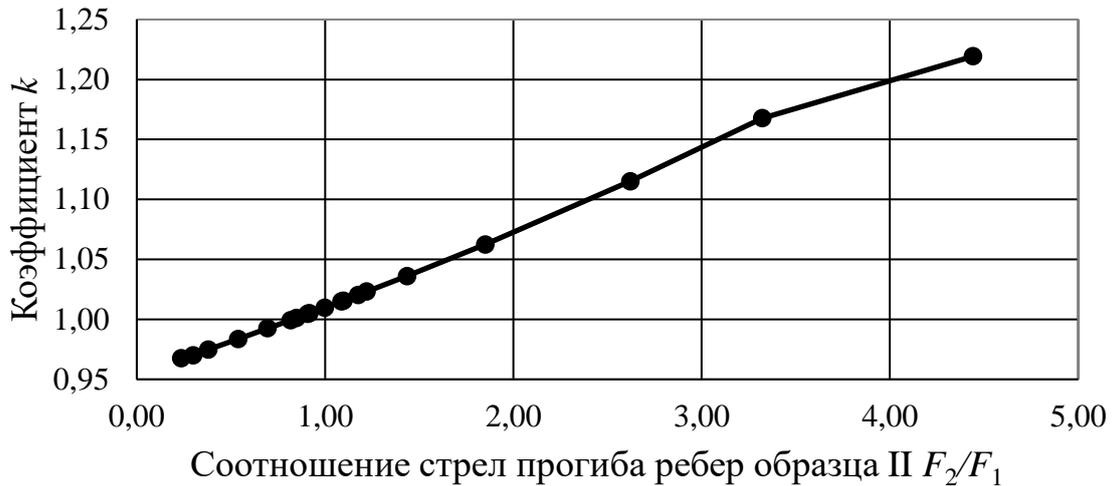


Рисунок 2.29 – Зависимость коэффициента k взаимовлияния рёбер от соотношения стрел прогиба рёбер образца II при их последовательной раскатке роликами

Как видно из зависимости (см. рисунок 2.29), взаимовлияние соседних рёбер при последовательной раскатке роликами становится ощутимым при разнице их стрел прогибов более чем в два раза. В остальных случаях влияние несущественно и им можно пренебречь, а расчёты по определению параметров процесса РР подкреплённых панелей – выполнять на расчётных участках, показанных на рисунке 2.30. Расчетный участок представляет собой ребро с прилегающими к нему участками полотна шириной, равной расстоянию между соседними рёбрами или до края детали.

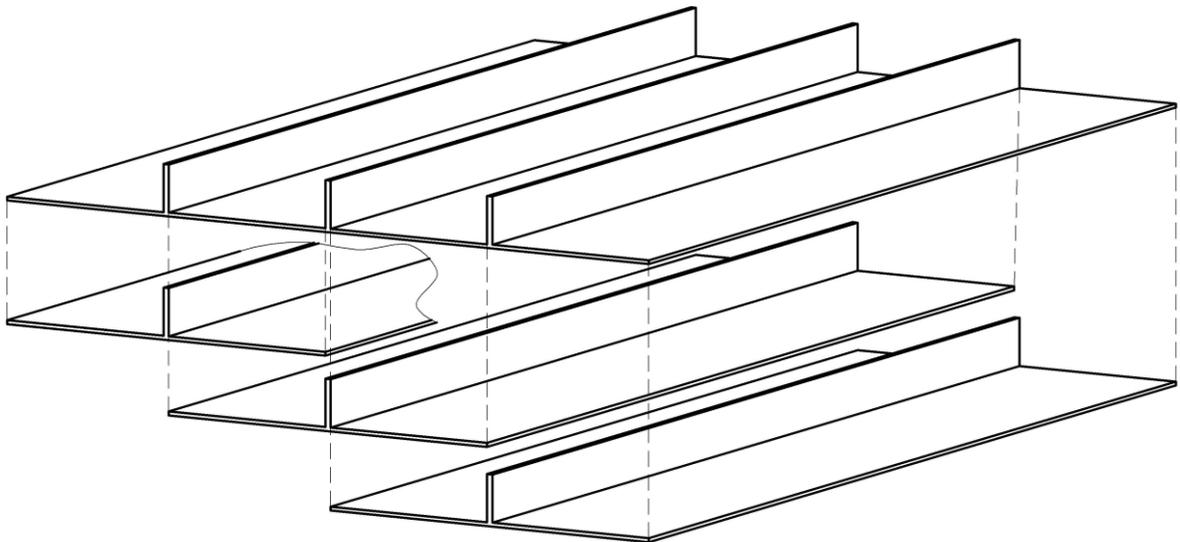


Рисунок 2.30 – Схема разбиения панели с продольным оребрением на расчётные участки

Для участка панели с тремя и более рёбрами, где коэффициент взаимовлияния между ними существен, стрелу прогиба PY для каждого ребра определяем по формуле:

$$f_{\text{расч}}^{PY} = f^{PY} k_I k_{II}, \quad (2.13)$$

где k_I – коэффициент взаимовлияния с соседним ребром слева;

k_{II} – коэффициент взаимовлияния с соседним ребром справа.

Итоговые расчётные стрелы прогибов PY для всей панели получаем, последовательно применяя формулу (2.14) ко всем рёбрам от одного края панели до другого (например, слева направо).

Выводы по главе

1. Разработан и обоснован способ компенсации продольной деформации при ДУФ для панелей с продольным оребрением. Способ реализует принцип упреждающего воздействия путём прогнозирования методом численного моделирования нежелательной продольной компоненты кривизны. Полученные значения служат исходными данными для расчёта режимов раскатки роликами, что обеспечивает формирование предварительной кривизны и полную компенсацию искажений от последующей операции ДУФ.

2. Предложен метод определения режимов ДУФ для расчётных участков детали, основанный на переборе значений внутренних силовых факторов из базы данных. База данных формируется по результатам конечно-элементного моделирования процесса ДУФ с варьируемыми режимами, что обеспечивает назначение оптимальных параметров обработки для каждого участка.

3. Установлено, что при достижении критической глубины внедрения роликов (0,04 мм) пластическая деформация охватывает всю толщину ребра. Это приводит к формированию в материале остаточных сжимающих напряжений, максимальных в направлении раскатки, что положительно влияет на ресурсные характеристики материала.

4. Доказана работоспособность разработанной конечно-элементной модели процесса РР на основании сравнения эпюр ОН, полученных численным моделированием и экспериментально на образцах механическим методом (методом полосок Н.Н. Давиденкова). Сравнение подтвердило достоверность модели для прогнозирования ОН в материале. Наблюдаемые отклонения не превышали 5% в основной части эпюр и достигали 24% на поверхности, что указывает на необходимость дальнейшего уточнения модели для учёта локальных эффектов трения и исходного напряжённого состояния заготовки

5. Выяснено, что ключевым условием применимости расчётных моделей процесса РР с эквивалентной растягивающей силой является требование полного геометрического подобия между технологическим образцом и реальной деталью, так как сила определяется по деформации образца и её корректный перенос на деталь возможен только при его выполнении. Нарушение принципа подобия приводит к значительным погрешностям. Так, увеличение или уменьшение толщины пластины на 2 мм вызывает отклонение расчётного значения на 38% и 339% соответственно, а смещение места обработки на 4 мм — на 10%.

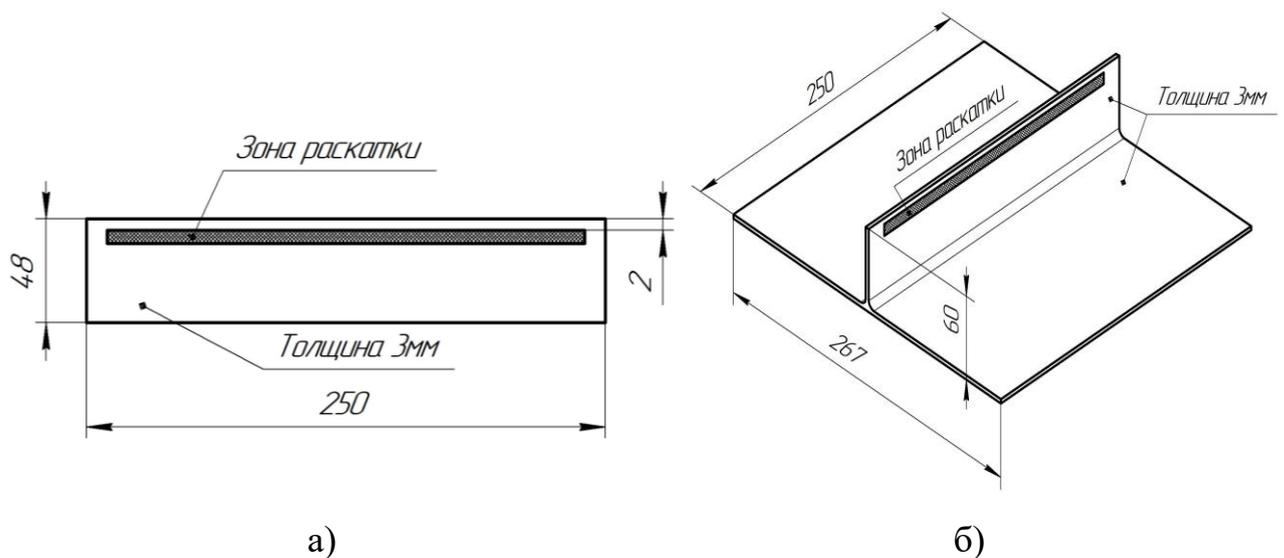
6. Определено, что взаимовлияние соседних рёбер при их последовательной раскатке роликами становится существенным, если стрелы прогиба различаются более чем в два раза. На основании этого предложено определять параметры процесса РР для подкреплённых панелей на элементарных расчётных участках, представляющих собой одно ребро с прилегающими участками полотна шириной, равной расстоянию между соседними рёбрами или до края детали. Количественно взаимовлияние характеризуется коэффициентом. При соотношении деформаций (стрел прогибов) соседних рёбер, равном 2, коэффициент взаимовлияния составляет 1,168. При соотношении 0,3 его значение равно 0,970. Наибольшему влиянию подвергается менее деформированное ребро.

3 Изучение технологического процесса формообразования панелей в последовательности “раскатка рёбер – дробеударное формообразование”

3.1 Тарировка оборудования для раскатки роликами

Как было показано в главе 2 пункта 3, деформированное состояние деталей при РР определяется глубиной внедрения роликов. Для дальнейшего выполнения технологических расчётов необходимо было разработать методику установления зависимости данного параметра от регулировочных параметров оборудования для реализации процесса РР. Для этого было выполнено моделирование и экспериментальное исследование процесса РР на образцах-пластинах, а также на образцах в виде РУ типовой монолитно-фрезерованной панели с продольным оребрением. Для компенсации деформации образцов, возникающей после фрезерования, выполняются предварительные измерения стрелы прогиба. Полученные данные учитываются при расчёте режимов обработки.

Эскизы образцов-пластин и образцов РУ для исследований показаны на рисунке 3.1, изготовленные из сплава В95пчТ2 образцы – на рисунке 3.2.

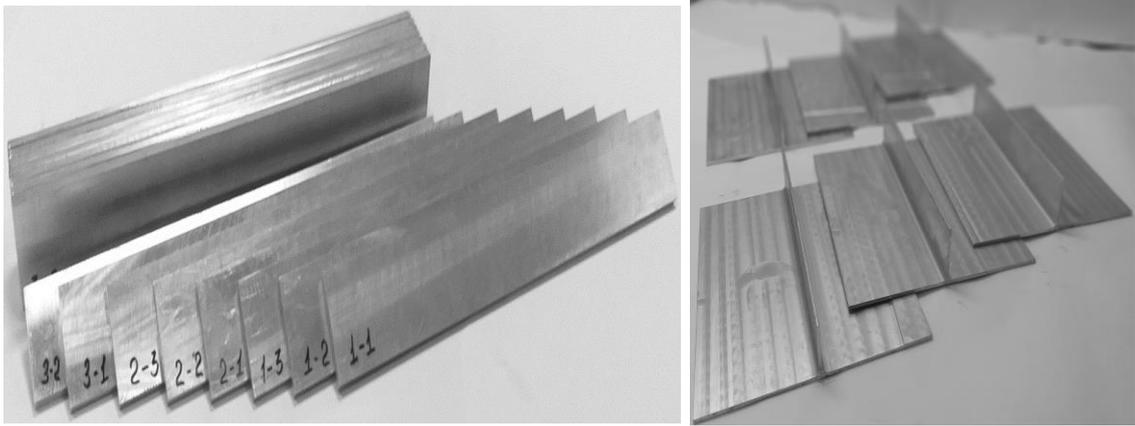


а)

б)

а – эскиз образца-пластины; б – эскиз образца РУ

Рисунок 3.1 – Эскизы образцов для испытаний



а)

б)

а – образцы-пластины; б – образцы РУ

Рисунок 3.2 – Образцы для проведения исследований

На каждый образец была нанесена маркировка:

Образец-пластина

| | | |
|----------------------------------|---|-----------|
| <i>XX</i> | . | <i>XX</i> |
| <i>Порядковый номер в группе</i> | | |
| <i>Номер группы</i> | | |

Образец РУ

| |
|----------------------|
| <i>XX</i> |
| <i>Номер образца</i> |

Раскатка образцов роликами осуществлялась на УФП-1 (рисунок 3.3).

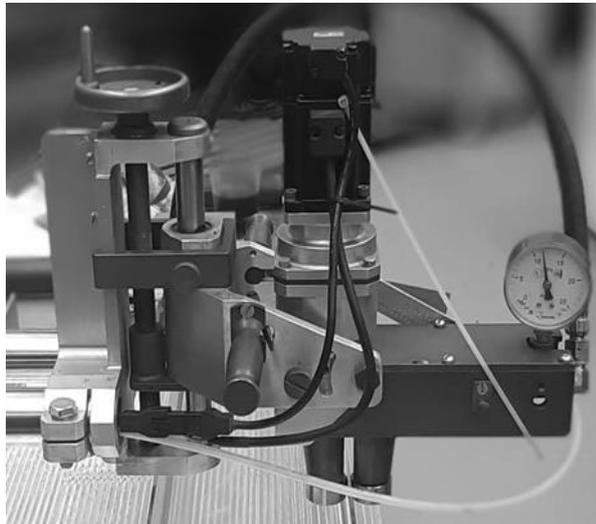


Рисунок 3.3 – Рабочий орган УФП-1

Стрелу прогиба $f_{изм}$ образцов на базе 200 мм до и после обработки измеряли с помощью приспособления в виде планки с индикатором часового типа согласно схеме, приведённой на рисунке 3.4.

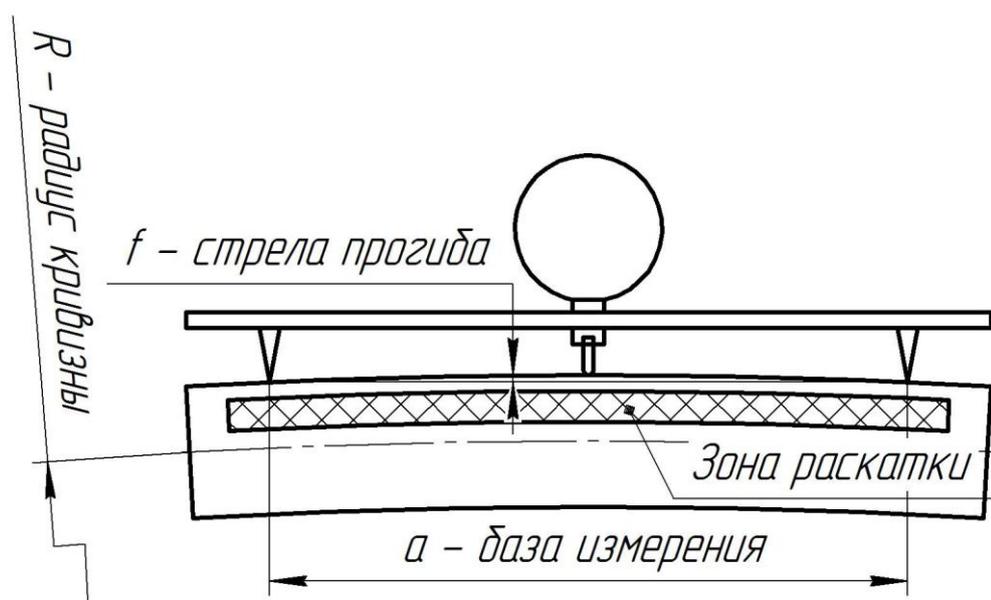


Рисунок 3.4 – Схема измерения образцов-пластин после раскатки

Силу воздействия роликов на образцы при раскатке контролировали с помощью манометра давления в гидросистеме сжатия роликов на УФП-1. Режимы обработки образцов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Режимы обработки образцов

| Режимы обработки образцов-пластин | | | Режимы обработки образцов РУ | |
|-----------------------------------|------------------------|---|------------------------------|---|
| Номер группы | Номер образца-пластины | Давление в гидросистеме сжатия роликов <i>P</i> , МПа | Номер образца РУ | Давление в гидросистеме сжатия роликов <i>P</i> , МПа |
| 1 | 2.01-2.03 | 4,4 | 1 | 11 |
| 2 | 2.04-2.06 | 5,9 | 2 | 11,5 |
| 3 | 2.07-2.09 | 8,7 | 3 | 12 |
| 4 | 2.10-2.12 | 11,2 | 4 | 12,5 |
| 5 | 2.13-2.15 | 13,8 | 5 | 13 |
| 6 | 2.16-2.18 | 16,3 | 6 | 13,5 |
| 7 | 2.19-2.21 | 19,6 | 7 | 14 |
| 8 | 2.22-2.24 | 21,9 | 8 | 14,5 |
| 9 | 2.25-2.27 | 24,1 | 9 | 15 |

Результаты измерений образцов-пластин и образцов РУ до и после раскатки роликами приведены в таблице 3.2 и 3.3 соответственно.

Таблица 3.2 – Результаты измерения стрелы прогиба образцов-пластин после РР

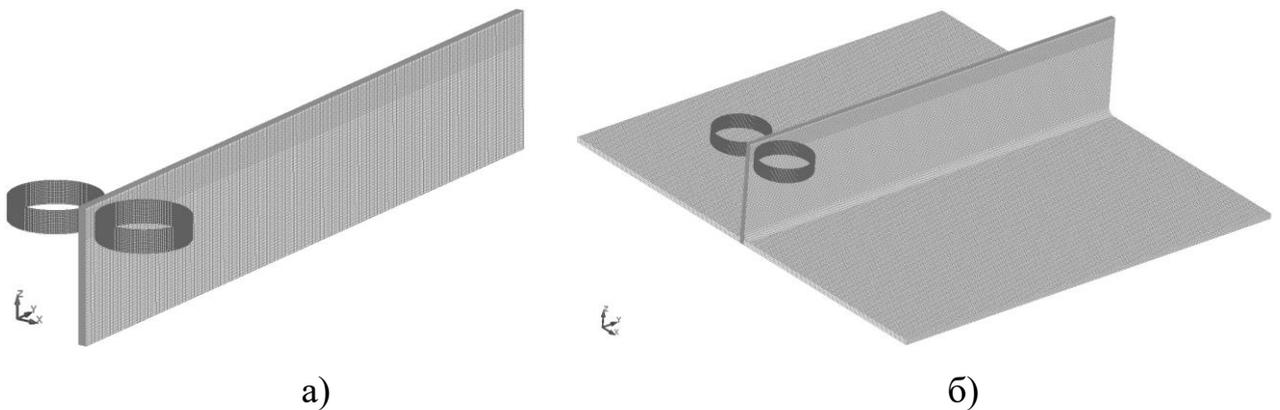
| Номер образца | Исходная стрела прогиба $f_{исх}$, мм | Измеренная стрела прогиба $f_{изм}$, мм | Результирующая стрела прогиба, $f = f_{изм} - f_{исх}$, мм | Среднее значение $f_{ср}$, мм | Давление в гидросистеме сжатия роликов P , МПа |
|---------------|--|--|---|--------------------------------|--|
| 1.01 | 0,04 | 0,07 | 0,03 | 0,03 | 4,4 |
| 1.02 | 0,04 | 0,06 | 0,02 | | |
| 1.03 | 0,03 | 0,07 | 0,04 | | |
| 1.04 | 0,01 | 0,1 | 0,09 | 0,08 | 5,9 |
| 1.05 | 0,01 | 0,09 | 0,08 | | |
| 1.06 | 0,01 | 0,09 | 0,08 | | |
| 1.07 | 0,03 | 0,21 | 0,18 | 0,18 | 8,7 |
| 1.08 | 0,02 | 0,19 | 0,17 | | |
| 1.09 | 0,02 | 0,2 | 0,18 | | |
| 1.10 | 0,04 | 0,34 | 0,3 | 0,29 | 11,2 |
| 1.11 | 0,05 | 0,34 | 0,29 | | |
| 1.12 | 0,05 | 0,33 | 0,28 | | |
| 1.13 | 0,03 | 0,49 | 0,46 | 0,47 | 13,8 |
| 1.14 | 0 | 0,48 | 0,48 | | |
| 1.15 | 0,03 | 0,49 | 0,46 | | |
| 1.16 | 0,04 | 0,67 | 0,63 | 0,62 | 16,3 |
| 1.17 | 0,04 | 0,65 | 0,61 | | |
| 1.18 | 0,04 | 0,66 | 0,62 | | |
| 1.19 | 0,02 | 0,79 | 0,77 | 0,76 | 19,6 |
| 1.20 | 0,02 | 0,78 | 0,76 | | |
| 1.21 | 0,02 | 0,78 | 0,76 | | |
| 1.22 | 0,03 | 0,91 | 0,88 | 0,88 | 21,9 |
| 1.23 | 0,03 | 0,9 | 0,87 | | |
| 1.24 | 0,03 | 0,91 | 0,88 | | |
| 1.25 | 0,03 | 0,98 | 0,95 | 0,95 | 24,1 |
| 1.26 | 0,03 | 0,99 | 0,96 | | |
| 1.27 | 0,02 | 0,97 | 0,95 | | |

Таблица 3.3 – Результаты измерения стрелы прогиба образцов РУ после РР

| Номер образца | Исходная стрела прогиба $f_{исх}$, мм | Измеренная стрела прогиба $f_{изм}$, мм | Результирующая стрела прогиба, $f = f_{изм} - f_{исх}$, мм | Давление в гидросистеме сжатия роликов P , МПа |
|---------------|--|--|---|--|
| 1 | -0,01 | 0,12 | 0,13 | 11 |
| 2 | -0,01 | 0,14 | 0,15 | 11,5 |
| 3 | -0,01 | 0,15 | 0,16 | 12 |
| 4 | 0 | 0,18 | 0,18 | 12,5 |
| 5 | -0,01 | 0,18 | 0,19 | 13 |
| 6 | -0,01 | 0,2 | 0,21 | 13,5 |
| 7 | -0,01 | 0,21 | 0,22 | 14 |
| 8 | -0,01 | 0,23 | 0,24 | 14,5 |
| 9 | -0,01 | 0,24 | 0,25 | 15 |

Конечно-элементная модель образца-пластины, представляющего собой типовой фрагмент продольного ребра панели крыла самолёта, имеет следующие параметры: толщина 3 мм, высота 48 мм, длина 250 мм. Конечно-элементная модель пластины состоит из гексаэдральных элементов размерами 0,5x0,075x1 мм в основной части пластины и 0,5x0,075x0,5 мм – в области РР. Количество узлов – 1 211 919, количество элементов – 1 160 000. Ролики диаметром 32 мм и шириной 8 мм. Конечно-элементная модель роликов состоит из гексаэдральных элементов размерами 0,5x0,5x2 мм, количество узлов 13 668, количество элементов – 6 432. Длина обрабатываемого участка 230 мм. Глубина внедрения роликов изменяется от 0,0200 до 0,1250 мм с шагом в 0,0050 мм. Расстояние от края роликов до края пластины – 2 мм; КЭМ пластины представлена на рисунке 3.5, а.

Образец РУ имеет следующие параметры: толщина ребра и полотна 3 мм, высота ребра 60 мм, ширина полотна 267 мм, длина 250 мм. КЭМ образца РУ состоит из гексаэдральных элементов размерами 0,5x0,075x1 мм в основной части ребра и 0,5x0,075x0,5 мм – в области РР. Полотно содержит элементы размерами 1x1x0,5 мм. Количество узлов 1 994 481, количество элементов 1 807 000; КЭМ образца РУ показана на рисунке 3.5, б.



а) б)

а – образец-пластины; б – образец РУ

Рисунок 3.5 – Конечно-элементные модели процесса РР

Результаты моделирования сведены в таблицу 3.4 в виде значений стрел прогиба образцов на базе 200 мм. Значение стрелы прогиба рассчитывалось в два этапа. Сначала определялся радиус кривизны с помощью штатных средств программы

LS-Prepost по значениям координат по оси Z трёх узлов, расположенных на расстояниях 25, 125, 225 мм от края пластины. Затем рассчитывалась стрела прогиба на базе 200 мм по формуле (2.2).

Таблица 3.4 – Результаты расчёта стрелы прогиба образцов-пластин на основе результатов моделирования процесса РР

| Глубина внедрения ролика в материал S , мм | Стрела прогиба образца-пластины f , мм | Глубина внедрения ролика в материал S , мм | Стрела прогиба образца-пластины f , мм |
|--|--|--|--|
| 0,0200 | 0,006 | 0,0750 | 0,164 |
| 0,0250 | 0,010 | 0,0800 | 0,212 |
| 0,0300 | 0,013 | 0,0850 | 0,267 |
| 0,0350 | 0,015 | 0,0900 | 0,324 |
| 0,0400 | 0,019 | 0,0950 | 0,394 |
| 0,0450 | 0,027 | 0,1000 | 0,484 |
| 0,0500 | 0,035 | 0,1050 | 0,591 |
| 0,0550 | 0,047 | 0,1100 | 0,721 |
| 0,0600 | 0,069 | 0,1150 | 0,877 |
| 0,0650 | 0,091 | 0,1200 | 1,036 |
| 0,0700 | 0,130 | 0,1250 | 1,323 |

По результатам моделирования построили график зависимости стрелы прогиба образцов-пластин от глубины внедрения роликов (рисунок 3.6). Экспериментальные данные представлены на графике зависимости стрелы прогиба аналогичных образцов от давления в гидросистеме сжатия роликов (рисунок 3.7). Экспериментальный график зависимости стрелы прогиба пластины $f_{пл}^{экс}$ от давления в гидросистеме сжатия роликов P , а также полученный на основе результатов моделирования график зависимости стрелы прогиба аналогичной пластины $f_{пл}^{мод}$ от глубины внедрения роликов S были аппроксимированы в программе Excel полиномами четвертой степени:

$$f_{пл}^{экс} = (4 \times 10^{-6})P^4 - 0,0004P^3 + 0,0102P^2 - 0,0572P + 0,1209, \quad (3.1)$$

$$f_{пл}^{мод} = 22275S^4 - 4515,4S^3 + 403,08S^2 - 14,38S + 0,176. \quad (3.2)$$

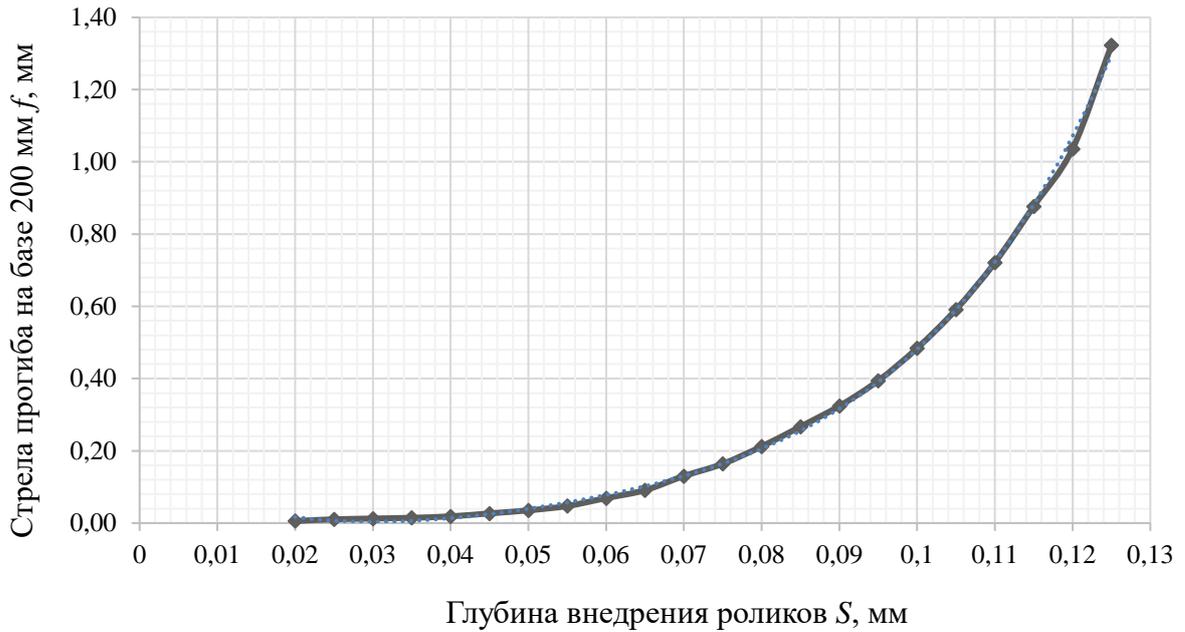


Рисунок 3.6 – График зависимости стрелы прогиба образцов-пластин на базе 200 мм от глубины внедрения роликов, полученный моделированием

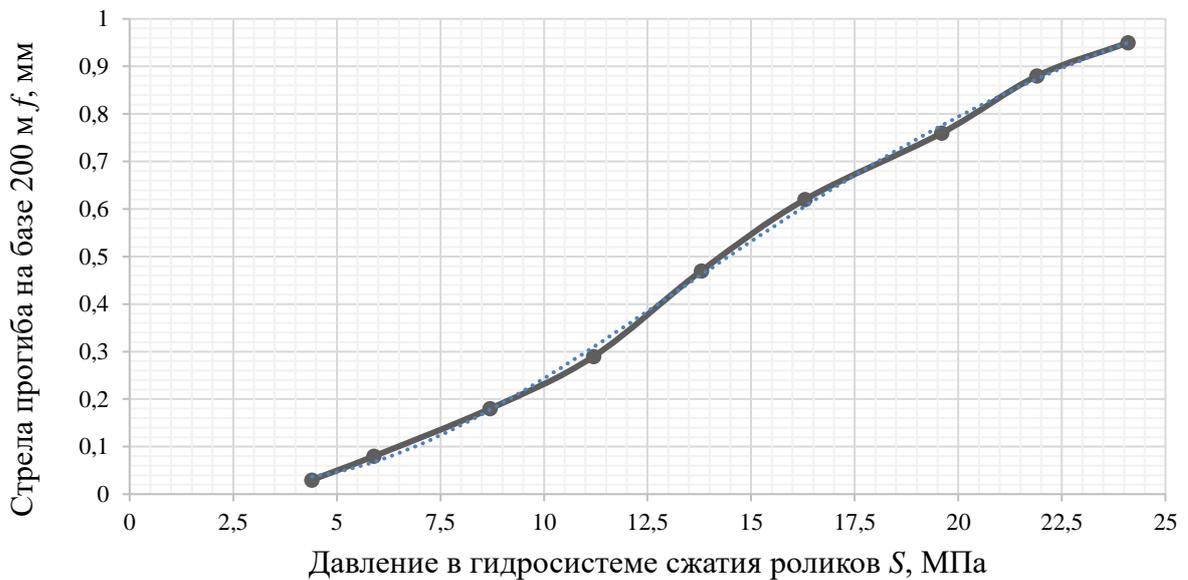


Рисунок 3.7 – Экспериментальный график зависимости стрелы прогиба образца-пластины от давления в гидросистеме сжатия роликов

Совместное решение уравнений (3.1) и (3.2) даёт возможность установить взаимосвязь значения глубины S внедрения роликов, полученного при моделировании, с давлением P в гидросистеме сжатия роликов, являющимся регулировочным параметром оборудования. Система уравнений решается путем подстановки

исходных данных в первое уравнение с последующим нахождением квадратичных корней второго уравнения, где искомое значение будет первым положительным рациональным числом. Результаты такого решения приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Расчетные значения глубины внедрения роликов

| Давление в гидросистеме сжатия роликов P , МПа | Глубина внедрения роликов при моделировании S , мм | Давление в гидросистеме сжатия роликов P , МПа | Глубина внедрения роликов при моделировании S , мм |
|--|--|--|--|
| 3,00 | 0,047354 | 14,37931 | 0,100739 |
| 3,758621 | 0,047285 | 15,13793 | 0,102813 |
| 4,517241 | 0,049669 | 15,89655 | 0,104701 |
| 5,275862 | 0,053723 | 16,65517 | 0,106423 |
| 6,034483 | 0,058688 | 17,41379 | 0,107993 |
| 6,793103 | 0,064 | 18,17241 | 0,109423 |
| 7,551724 | 0,069267 | 18,93103 | 0,110726 |
| 8,310345 | 0,074249 | 19,68966 | 0,111912 |
| 9,068966 | 0,078832 | 20,44828 | 0,112989 |
| 9,827586 | 0,082992 | 21,2069 | 0,113967 |
| 10,58621 | 0,086746 | 21,96552 | 0,114853 |
| 11,34483 | 0,090131 | 22,72414 | 0,115654 |
| 12,10345 | 0,093188 | 23,48276 | 0,116378 |
| 12,86207 | 0,095953 | 24,24138 | 0,117032 |
| 13,62069 | 0,098461 | 25 | 0,117622 |

График, построенный по результатам расчёта, показан на рисунке 3.8, аппроксимацию зависимости $S=f(P)$ представляет уравнение (3.3):

$$S = 9 \cdot 10^{-7} P^4 - 5 \cdot 10^{-5} P^3 + 0,0008 P^2 - 0,0005 P + 0,0366. \quad (3.3)$$

Уравнение (3.3) является тарифовочным, связывающим глубину S внедрения роликов в материал В95пчТ2, являющуюся деформационным фактором процесса РР с регулировочными параметрами технологического оборудования: диаметром роликов (32 мм), их шириной (8 мм) и давлением в гидроцилиндре сжатия роликов на УФП-1.

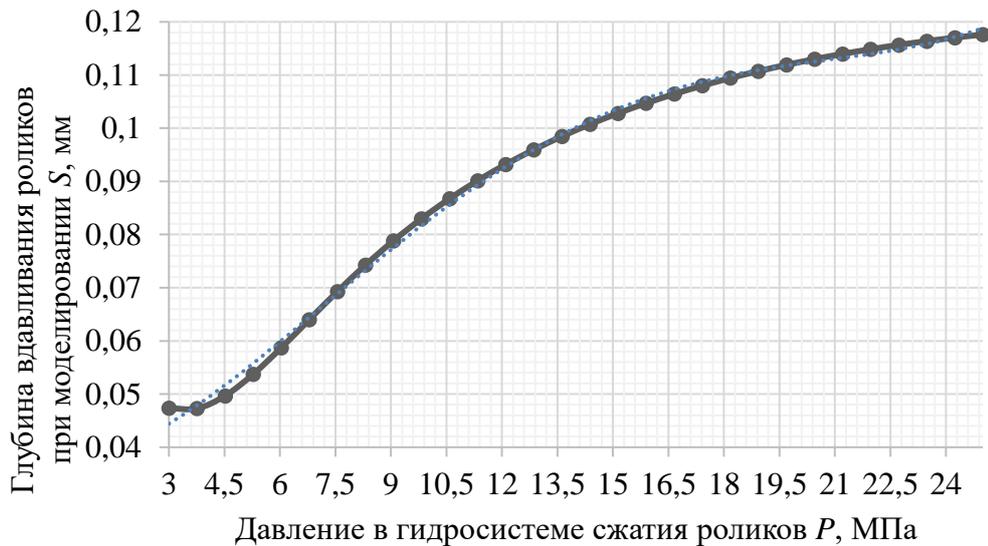


Рисунок 3.8 – График зависимости глубины внедрения роликов на УФП-1 в материал В95пчТ2 от давления в гидроцилиндре сжатия роликов

Разработанная методика была апробирована на образце РУ панели крыла самолёта (см. рисунок 3.2). Для этого по результатам моделирования определили стрелу прогиба образца РУ в зависимости от глубины внедрения ролика в материал (таблица 3.6), построили соответствующий график (рисунок 3.9) и аппроксимировали его в программе Excel полиномом четвертой степени уравнение (3.4):

$$f_{\text{РУ}}^{\text{МОД}} = 3516,4S^4 - 105,36S^3 - 7,3766S^2 + 0,5993S - 0,0059. \quad (3.4)$$

Таблица 3.6 – Результаты расчёта стрелы прогиба РУ панели на основе результатов моделирования процесса РР

| Глубина внедрения ролика в материал S, мм | Стрела прогиба образца РУ $f_{\text{РУ}}$, мм | Глубина внедрения ролика в материал S, мм | Стрела прогиба образца РУ $f_{\text{РУ}}$, мм |
|---|--|---|--|
| 0,0200 | 0,003 | 0,0750 | 0,064 |
| 0,0250 | 0,004 | 0,0800 | 0,083 |
| 0,0300 | 0,006 | 0,0850 | 0,108 |
| 0,0350 | 0,007 | 0,0900 | 0,144 |
| 0,0400 | 0,009 | 0,0950 | 0,180 |
| 0,0450 | 0,012 | 0,1000 | 0,227 |
| 0,0500 | 0,014 | 0,1050 | 0,282 |
| 0,0550 | 0,018 | 0,1100 | 0,349 |
| 0,0600 | 0,026 | 0,1150 | 0,421 |
| 0,0650 | 0,038 | 0,1200 | 0,498 |
| 0,0700 | 0,050 | 0,1250 | 0,611 |

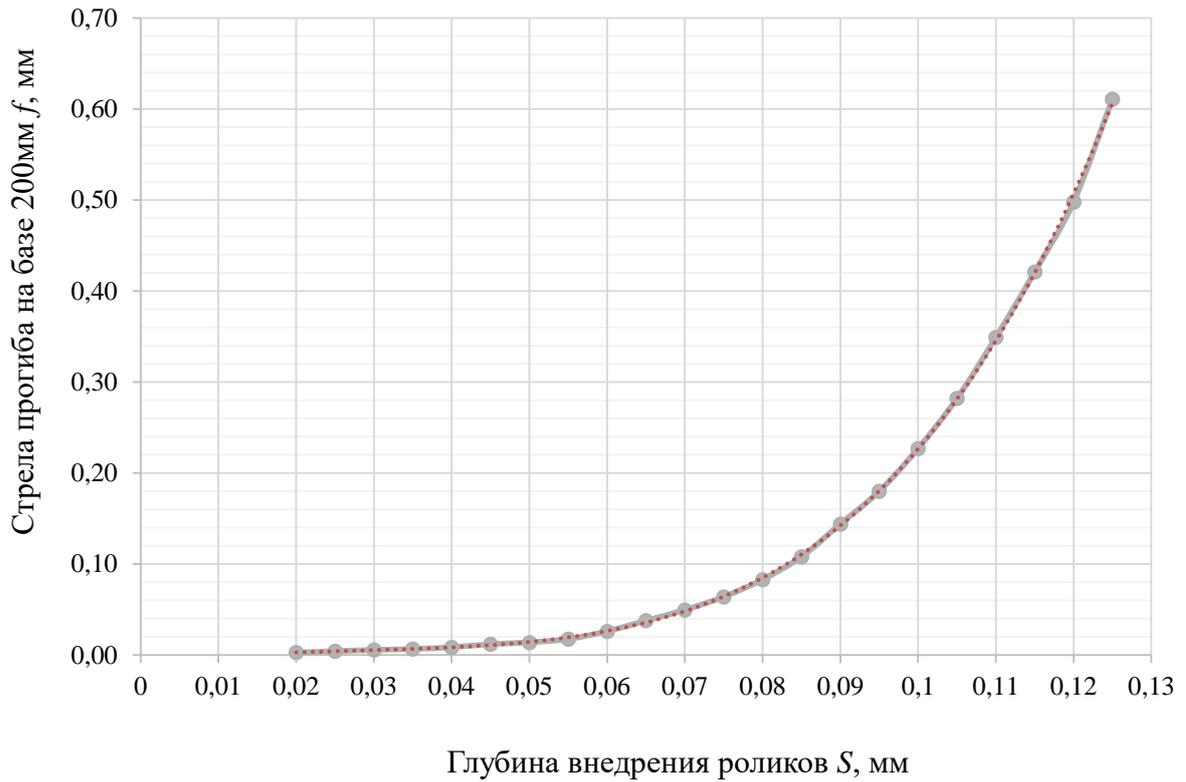


Рисунок 3.9 – График зависимости стрелы прогиба образцов РУ от глубины внедрения роликов, полученный моделированием

Результаты сравнения стрел прогиба, полученные экспериментальным путём (см. таблица 3.6) и расчетом при помощи уравнений (3.4) и (3.1), (3.2) представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты сравнения расчётных и экспериментальных стрел прогибов образца РУ

| Давление в гидросистеме сжатия роликов P , МПа | Стрела прогиба образца РУ f , мм | | Относительное отклонение, % |
|--|------------------------------------|-------------------|-----------------------------|
| | расчетная | экспериментальная | |
| 11 | 0,1329 | 0,13 | -2,2 |
| 11,5 | 0,1477 | 0,15 | 1,5 |
| 12 | 0,1627 | 0,16 | -1,7 |
| 12,5 | 0,1777 | 0,18 | 1,3 |
| 13 | 0,1928 | 0,19 | -1,5 |
| 13,5 | 0,2079 | 0,21 | 1,0 |
| 14 | 0,2228 | 0,22 | -1,3 |
| 14,5 | 0,2376 | 0,24 | 1,0 |
| 15 | 0,2521 | 0,25 | -0,9 |

Как видно из таблицы, расчётные и экспериментальные результаты имеют высокую сходимость $\pm 2,2\%$, что свидетельствует о достоверности предлагаемой методистки тарировки технологического оборудования для РР.

Таким образом, для тарировки технологического оборудования для РР достаточно выполнить обработку и измерение необходимого для построения и аппроксимации экспериментального графика, показанного на рисунке 3.7, количества образцов-пластин из материала обрабатываемых деталей и получить уравнение $f_{\text{пл}}^{\text{экс}} = F(P)$ вида (3.1). Используя моделирование в САЕ – системе получить второе уравнение $f_{\text{пл}}^{\text{мод}} = F(S)$ вида (3.2) и выполнив необходимые расчёты получить зависимость вида (3.3) глубины внедрения роликов от регулировочного параметра оборудования (давление в гидросистеме, момент затяжки силового болта и т.д.).

В дальнейшем для выполнения технологических расчётов и формирования баз данных можно использовать конечно-элементное моделирование процесса РР на образцах в виде РУ деталей взамен их опытной обработки.

3.2 Исследование процесса формообразования образца панели с ребрами прямоугольного сечения в последовательности РР–ДУФ

Для проверки разработанной расчетной методики проводился эксперимент по формообразованию конструктивно подобного образца панели с ребрами прямоугольного сечения в последовательности РР–ДУФ. Для исследования был изготовлен КПО панели крыла самолета (см. рисунок 3.10) из сплава В95пчТ2 и габаритными размерами 1950x545x50 мм. Пространственная форма КПО представляла собой “седло” с радиусом поперечной кривизны $R_x = 6$ м и с переменным радиусом продольной кривизны (рисунок 3.10):

- $R_y = 25$ м – в районе сечения 1 (точки 1.1, 2.1, 3.1); сечения 2 (точки 1.2, 2.2, 3.2); сечения 3 (точки 1.3, 2.3, 3.3);

- $R_y = 26,3$ м – в районе сечения 4 (точки 1.4, 2.4, 3.4); сечения 5 (точки 1.5, 2.5, 3.5); сечения 3 (точки 1.3, 2.3, 3.3);

- $R_y = 27,8$ м – в районе сечения 6 (точки 1.6, 2.6, 3.6).

Используя ЭМД КПО (рисунок 3.12) по методике, приведённой в 2.1 и 2.2, рассчитали значения нежелательной продольной компоненты $\kappa_y^{ДУФ}$ кривизны КПО, образующейся при ДУФ, в контрольных точках (рисунок 3.11), которые пересчитали в стрелы прогиба f_y на базе 200 мм и занесли в таблице 3.8.

Стрелу f_y прогиба КПО на базе 200 мм до и после обработки измеряли с помощью мерительной планки (см. рисунок 3.4) в контрольных точках согласно схеме, показанной на рисунке 3.11 (расстояние между точками 200 мм; нумерация точек: первая цифра – номер ребра, вторая – порядковый номер). Измерение стрел прогибов выполняли в вертикальном положении КПО для исключения влияния собственного веса.

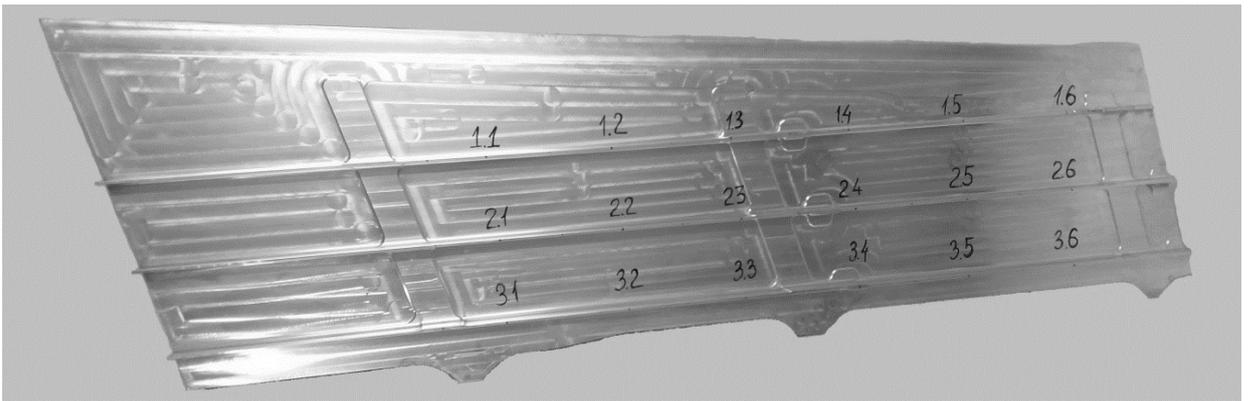


Рисунок 3.10 – КПО панели с ребрами прямоугольного сечения

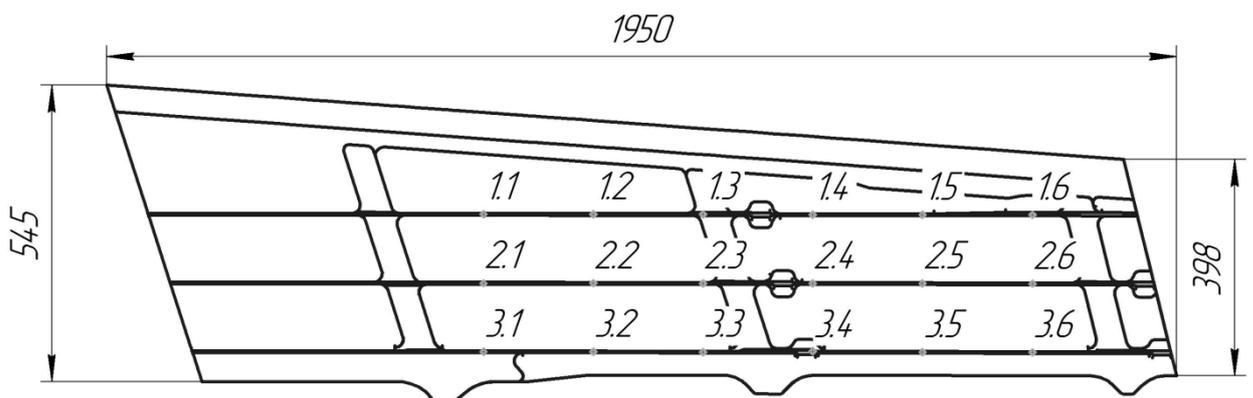


Рисунок 3.11 – Схема разметки КПО панели с ребрами прямоугольного сечения

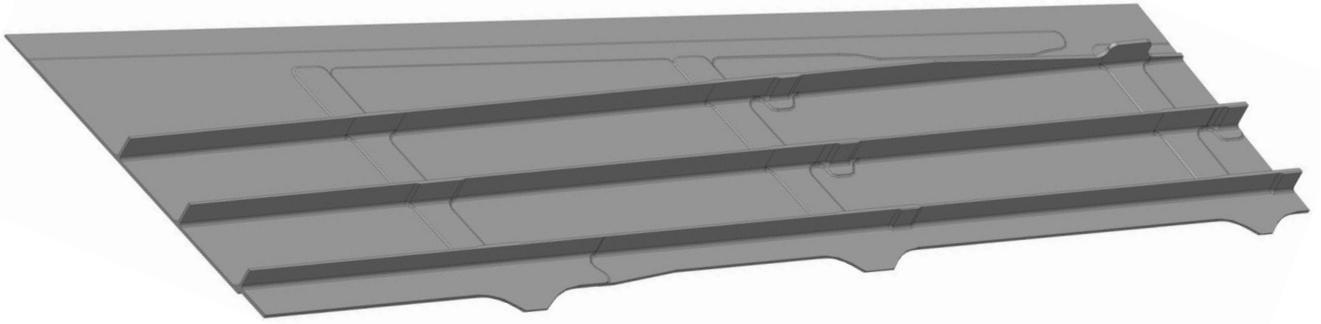


Рисунок 3.12 – электронная модель детали КПО панели с рёбрами
прямоугольного сечения

Таблица 3.8 – Значения стрел продольного прогиба, режимов РР и отклонений КПО панели с ребрами прямоугольного сечения

| Контрольная точка | Стрела прогиба f_y на базе 200 мм, мм | | | | | | Давление в гидросистеме сжатия роликов P , МПа | Относительное отклонение после РР, % | Относительное отклонение после ДУФ, % |
|-------------------|---|-----------|-------------|----------------------------------|----------|-----------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|
| | исходная | требуемая | фактическая | компенсирующая поперечный изгиба | после РР | после ДУФ | | | |
| 1.1 | 0,01 | 0,20 | 0,19 | 0,21 | 0,22 | 0,21 | 10,4 | 4,8 | -5,0 |
| 1.2 | 0 | 0,20 | 0,20 | 0,23 | 0,23 | 0,2 | 11,8 | 0,0 | 0,0 |
| 1.3 | 0 | 0,19 | 0,19 | 0,22 | 0,21 | 0,2 | 11,1 | -4,5 | -5,3 |
| 1.4 | 0 | 0,19 | 0,19 | 0,22 | 0,21 | 0,2 | 11,1 | -4,5 | -5,3 |
| 1.5 | 0,01 | 0,18 | 0,17 | 0,2 | 0,2 | 0,19 | 9,8 | 0,0 | -5,6 |
| 1.6 | -0,01 | 0,18 | 0,19 | 0,22 | 0,23 | 0,18 | 11,1 | 4,5 | 0,0 |
| 2.1 | 0 | 0,20 | 0,20 | 0,23 | 0,22 | 0,21 | 11,8 | -4,3 | -5,0 |
| 2.2 | -0,01 | 0,20 | 0,21 | 0,24 | 0,23 | 0,2 | 12,5 | -4,2 | 0,0 |
| 2.3 | 0 | 0,19 | 0,19 | 0,22 | 0,23 | 0,19 | 11,1 | 4,5 | 0,0 |
| 2.4 | 0,01 | 0,19 | 0,18 | 0,21 | 0,21 | 0,18 | 10,4 | 0,0 | 5,3 |
| 2.5 | 0 | 0,18 | 0,18 | 0,21 | 0,21 | 0,19 | 10,4 | 0,0 | -5,6 |
| 2.6 | 0 | 0,18 | 0,18 | 0,21 | 0,2 | 0,19 | 10,4 | -4,8 | -5,6 |
| 3.1 | 0 | 0,20 | 0,20 | 0,23 | 0,22 | 0,21 | 11,8 | -4,3 | -5,0 |
| 3.2 | 0 | 0,20 | 0,20 | 0,23 | 0,23 | 0,2 | 11,8 | 0,0 | 0,0 |
| 3.3 | 0 | 0,19 | 0,19 | 0,22 | 0,22 | 0,18 | 11,1 | 0,0 | 5,3 |
| 3.4 | 0 | 0,19 | 0,19 | 0,22 | 0,21 | 0,18 | 11,1 | -4,5 | 5,3 |
| 3.5 | 0 | 0,18 | 0,18 | 0,21 | 0,21 | 0,19 | 10,4 | 0,0 | -5,6 |
| 3.6 | -0,01 | 0,18 | 0,19 | 0,22 | 0,23 | 0,18 | 11,1 | 4,5 | 0,0 |

Для расчета режимов обработки РР по методике, описанной в п 3.1, ЭМД КПО разбили на РУ модели, которые представлены на рисунке 3.13.

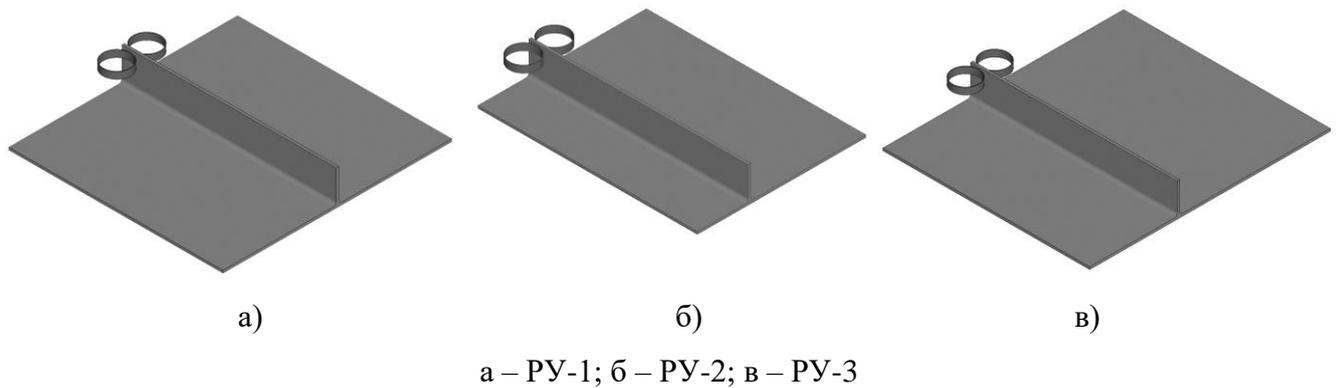


Рисунок 3.13 – Конечно-элементная модель расчётных участков КПО панели

Раскатку рёбер КПО (рисунок 3.14) осуществляли на УФП-1 со следующими размерами роликов: диаметр – 32 мм; ширина – 15 мм.

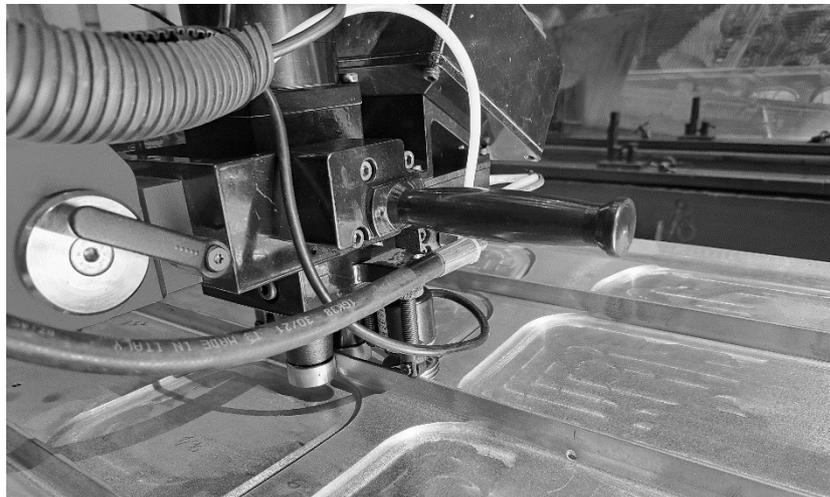


Рисунок 3.14 – Раскатка рёбер КПО панели с ребрами прямоугольного сечения на УФП-1

После моделирования процесса РР образцов РУ КПО получили аппроксимирующие уравнения, связывающие стрелы прогиба КПО с глубиной внедрения роликов:

$$f_{\text{РУ-1}} = 3668,6S^4 - 102,2S^3 - 8,7758S^2 + 0,6758S - 0,0071;$$

$$f_{\text{РУ-2}} = 3778,7S^4 - 105,26S^3 - 9,039S^2 + 0,6961S - 0,0073;$$

$$f_{\text{РУ-3}} = 3485,2S^4 - 97,086S^3 - 8,337S^2 + 0,6421S - 0,0067.$$

Путем решения тарировочного уравнения (3.3) рассчитали давление в гидросистеме сжатия роликов, соответствующее фактическим значениям требуемых стрел прогиба в контрольных точках КПО (см. рисунок 3.11, таблицу 3.8). По ре-

зультатам расчёта составили управляющую программу процесса РР. В связи с переменной кривизной рёбер, параметры обработки (давление в гидросистеме) будут регулироваться в соответствии с управляющей программой.

После раскатки рёбер КПО с рассчитанными режимами измерили стрелы прогибов в контрольных точках; результаты занесли в таблицу 3.8.

Дробеударное формообразование КПО путём обработки его наружной стороны дробью диаметром 3,5 мм в программном режиме управления выполняли на установке УДФ-4 (рисунок 3.15).



Рисунок 3.15 – Дробеударное формообразование КПО панели с ребрами прямоугольного сечения на установке УДФ-4

Предварительно были рассчитаны режимы ДУФ КПО, необходимые для получения поперечной кривизны КПО с радиусом $R_x = 6$ м: скорость подачи дробе-метного аппарата $s = 933$ мм/мин; частота вращения дробе-метного колеса диаметром 400 мм – $1\,000$ мин⁻¹.

Результаты измерения стрелы f_y продольного прогиба до и после ДУФ представлены в таблице 3.8, результаты измерения стрелы f_x поперечного прогиба – в таблице 3.9. Окончательный контроль поперечной кривизны осуществлялся с помощью ШКС, применяемого для контроля серийных деталей, и комплекта щупов (рисунок 3.16).



Рисунок 3.16 – Контроль поперечной кривизны КПО при помощи ШКС

Таблица 3.9 – Результаты измерения стрел прогиба в поперечном направлении в контрольных точках КПО с рёбрами прямоугольного сечения после обработки в последовательности РР–ДУФ

| Контрольная точка | Стрела f_x прогиба на базе 200 мм, мм | | | Относительное отклонение, % |
|-------------------|---|----------|-----------|-----------------------------|
| | исходная | после РР | после ДУФ | |
| 1.1 | -0,01 | -0,01 | 0,76 | -8,8 |
| 1.2 | 0 | 0 | 0,8 | -4,0 |
| 1.3 | -0,01 | -0,01 | 0,8 | -4,0 |
| 1.4 | 0 | 0 | 0,8 | -4,0 |
| 1.5 | 0,01 | 0,01 | 0,81 | -2,8 |
| 1.6 | 0 | 0 | 0,78 | -6,4 |
| 2.1 | -0,01 | -0,01 | 0,8 | -4,0 |
| 2.2 | -0,01 | -0,01 | 0,81 | -2,8 |
| 2.3 | 0 | 0 | 0,8 | -4,0 |
| 2.4 | 0 | 0 | 0,8 | -4,0 |
| 2.5 | 0 | 0 | 0,76 | -8,8 |
| 2.6 | -0,01 | -0,01 | 0,8 | -4,0 |
| 3.1 | 0,01 | 0,01 | 0,8 | -4,0 |
| 3.2 | 0 | 0 | 0,81 | -2,8 |
| 3.3 | -0,01 | -0,01 | 0,79 | -5,2 |
| 3.4 | 0 | 0 | 0,78 | -6,4 |
| 3.5 | 0 | 0 | 0,81 | -2,8 |
| 3.6 | 0 | 0 | 0,77 | -7,6 |

Анализ результатов измерений показывает, что после обработки КПО панели с рёбрами прямоугольного сечения в программном режиме управления в последовательности РР–ДУФ достигнута требуемая форма поверхности. В продольном

направлении отклонение контура аэродинамической поверхности составляет не более 6 % (см. таблицу 3.8). При этом отклонение контура аэродинамической поверхности в поперечном направлении составляет не более 9 % (см. таблицу 3.9). Из этого следует вывод, что разработанная методика расчета показывает достаточную сходимость и может быть использована при выполнении технологических расчётов применительно к реальным деталям.

3.3 Исследование процесса формообразования образца панели с ребрами Г-образного сечения в последовательности РР–ДУФ

Для оценки влияния формы сечения ребра на результаты расчёта технологических параметров обработки в последовательности РР–ДУФ был проведён эксперимент по формообразованию КПО панели с ребрами Г-образного сечения. Для этого был изготовлен КПО панели крыла самолета из сплава В95пчТ2 размерами 1000x1000x50 мм (рисунок 3.17).

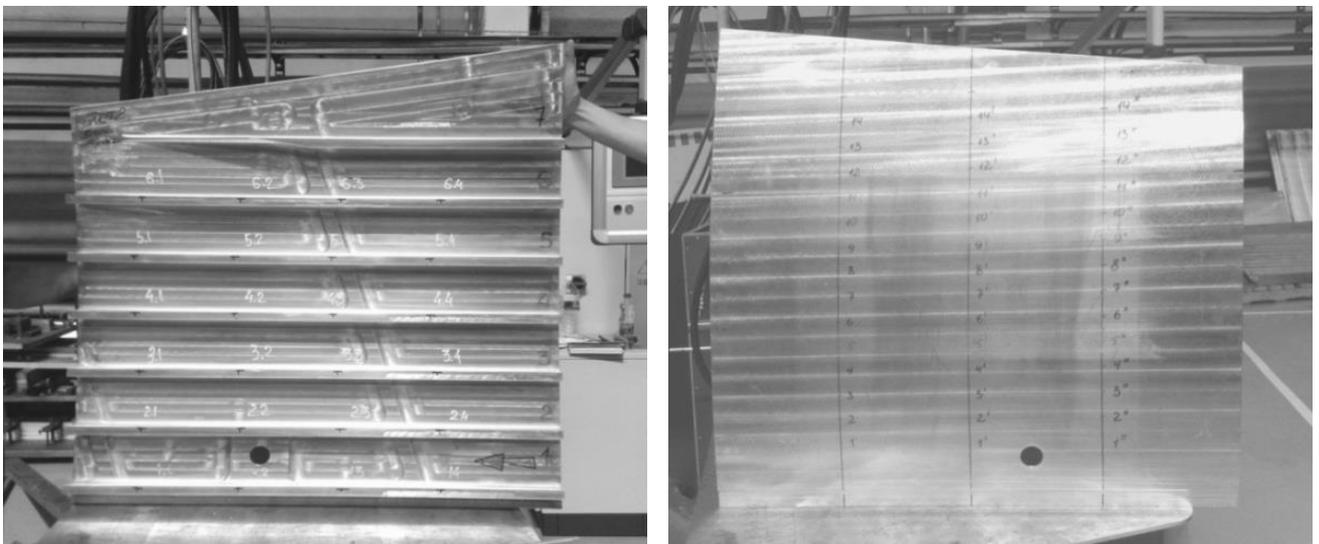


Рисунок 3.17 – КПО панели с ребрами Г-образного сечения

Пространственная форма КПО представляла собой “седло” с радиусом поперечной кривизны $R_x = 6$ м и с переменным радиусом продольной кривизны (рисунок 3.10):

- $R_y = 25$ м – в районе сечения 2 (точки 1.2–6.2);

- $R_y = 27,8$ м – в районе сечения 1 (точки 1.1–6.1); сечения 3 (точки 1.3–6.3);
- $R_y = 31,3$ м – в районе сечения 4 (точки 1.4–6.4) и в точках 7.1, 7.2.

Экспериментальное исследование выполняли по методике, описанной в предыдущей главе.

На рисунке приведена 3.18 ЭМД КПО; схема разметки контрольных точек – на рисунке 3.19; геометрические характеристики и результаты измерений – в таблице 3.10; модели РУ – на рисунке 3.20.

Раскатку рёбер КПО осуществляли на УФП-1 со следующими размерами роликов: диаметр – 64 мм; ширина – 15 мм.

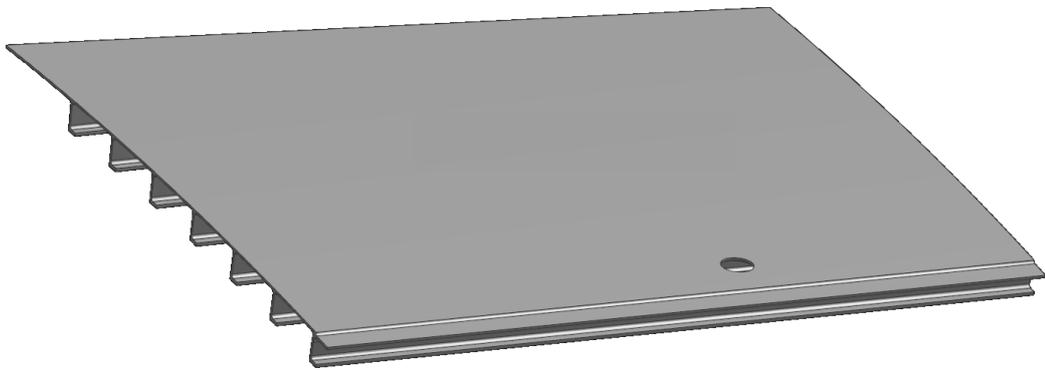


Рисунок 3.18 – Электронная модель КПО панели с рёбрами Г-образного сечения

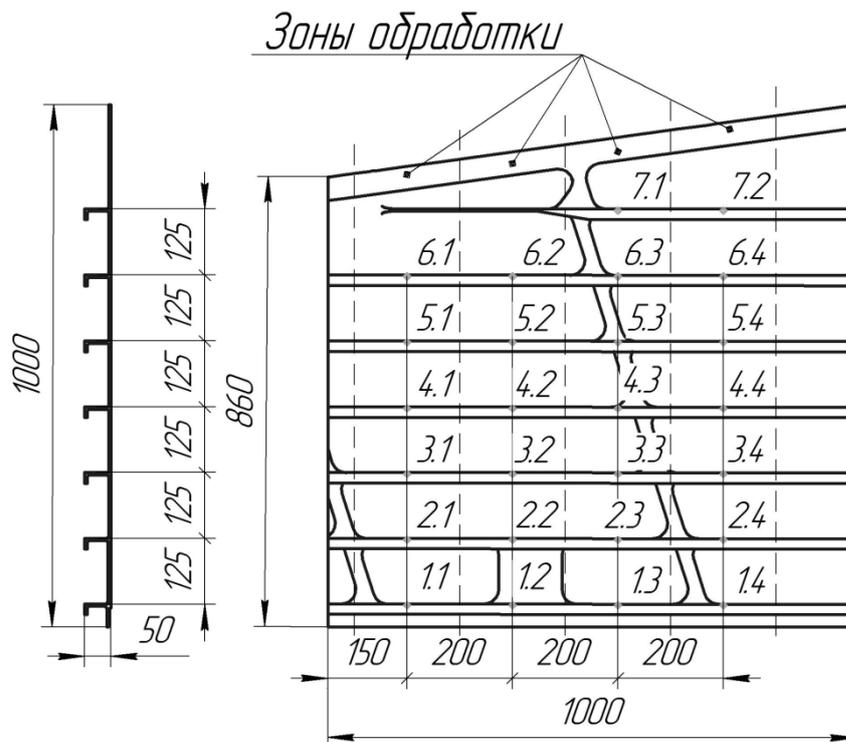


Рисунок 3.19 – Схема разметки КПО панели с рёбрами Г-образного сечения

Таблица 3.10 – Значения стрел продольного прогиба, режимов РР и отклонений КПО панели с рёбрами Г-образного сечения

| Контрольная точка | Стрела прогиба f_y на базе 200 мм, мм | | | | | | Давление в гидросистеме сжатия роликов P , МПа | Относительное отклонение после РР, % | Относительное отклонение после ДУФ, % |
|-------------------|---|-----------|-------------|---------------------------------|----------|-----------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|
| | исходная | требуемая | фактическая | компенсирующая поперечный изгиб | после РР | после ДУФ | | | |
| 1.1 | 0,01 | 0,18 | 0,17 | 0,19 | 0,18 | 0,19 | 9,3 | -5,3 | -5,6 |
| 1.2 | 0 | 0,2 | 0,2 | 0,22 | 0,21 | 0,21 | 11,3 | -4,5 | -5,0 |
| 1.3 | 0 | 0,18 | 0,18 | 0,2 | 0,21 | 0,19 | 9,7 | 5,0 | -5,6 |
| 1.4 | 0 | 0,16 | 0,16 | 0,18 | 0,19 | 0,17 | 8,6 | 5,6 | -6,3 |
| 2.1 | 0,01 | 0,18 | 0,17 | 0,19 | 0,2 | 0,19 | 9,3 | 5,3 | -5,6 |
| 2.2 | -0,01 | 0,2 | 0,21 | 0,23 | 0,24 | 0,19 | 11,7 | 4,3 | 5,0 |
| 2.3 | 0 | 0,18 | 0,18 | 0,2 | 0,21 | 0,17 | 9,7 | 5,0 | 5,6 |
| 2.4 | -0,01 | 0,16 | 0,17 | 0,19 | 0,21 | 0,15 | 9,3 | 10,5 | 6,3 |
| 3.1 | 0 | 0,18 | 0,18 | 0,2 | 0,21 | 0,17 | 9,7 | 5,0 | 5,6 |
| 3.2 | 0,01 | 0,2 | 0,19 | 0,21 | 0,2 | 0,21 | 10,6 | -4,8 | -5,0 |
| 3.3 | 0 | 0,18 | 0,18 | 0,2 | 0,21 | 0,19 | 9,7 | 5,0 | -5,6 |
| 3.4 | 0 | 0,16 | 0,16 | 0,18 | 0,19 | 0,15 | 8,6 | 5,6 | 6,3 |
| 4.1 | 0 | 0,18 | 0,18 | 0,2 | 0,21 | 0,19 | 9,7 | 5,0 | -5,6 |
| 4.2 | 0 | 0,2 | 0,2 | 0,22 | 0,23 | 0,2 | 11,3 | 4,5 | 0,0 |
| 4.3 | 0 | 0,18 | 0,18 | 0,2 | 0,22 | 0,19 | 9,7 | 10,0 | -5,6 |
| 4.4 | 0 | 0,16 | 0,16 | 0,18 | 0,2 | 0,17 | 8,6 | 11,1 | -6,3 |
| 5.1 | 0 | 0,18 | 0,18 | 0,2 | 0,21 | 0,19 | 9,7 | 5,0 | -5,6 |
| 5.2 | -0,01 | 0,2 | 0,21 | 0,23 | 0,24 | 0,21 | 11,7 | 4,3 | -5,0 |
| 5.3 | 0 | 0,18 | 0,18 | 0,2 | 0,21 | 0,18 | 9,7 | 5,0 | 0,0 |
| 5.4 | 0 | 0,16 | 0,16 | 0,18 | 0,2 | 0,17 | 8,6 | 11,1 | -6,3 |
| 6.1 | 0,01 | 0,18 | 0,17 | 0,19 | 0,2 | 0,19 | 9,3 | 5,3 | -5,6 |
| 6.2 | 0 | 0,2 | 0,2 | 0,22 | 0,23 | 0,2 | 11,3 | 4,5 | 0,0 |
| 6.3 | 0,01 | 0,18 | 0,17 | 0,19 | 0,2 | 0,19 | 9,3 | 5,3 | -5,6 |
| 6.4 | 0 | 0,16 | 0,16 | 0,18 | 0,19 | 0,16 | 8,6 | 5,6 | 0,0 |
| 7.1 | 0 | 0,16 | 0,16 | 0,18 | 0,18 | 0,17 | 8,6 | 0,0 | -6,3 |
| 7.2 | 0 | 0,16 | 0,16 | 0,18 | 0,19 | 0,17 | 8,6 | 5,6 | -6,3 |

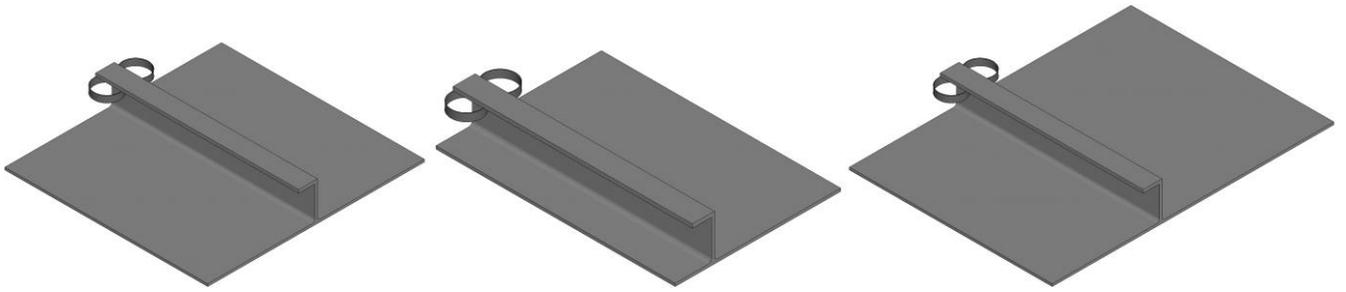


Рисунок 3.20 – Конечно-элементная модель КПО панели с рёбрами Г-образного сечения

После моделирования процесса РР образцов РУ КПО получили аппроксимирующие уравнения, связывающие стрелы прогиба КПО с глубиной внедрения роликов:

$$f_{PV-1} = 3\,632S^4 - 101,17S^3 - 8,688S^2 + 0,6691S - 0,0066;$$

$$f_{PV-2} = 3\,459S^4 - 96,356S^3 - 8,2743S^2 + 0,6372S - 0,0063;$$

$$f_{PV-3} = 3\,286,1S^4 - 91,538S^3 - 7,8606S^2 + 0,6054S - 0,006.$$

Решением тарировочного уравнения (3.3) рассчитали давление в гидросистеме сжатия роликов, соответствующее фактическим значениям требуемых стрел прогиба в контрольных точках КПО (см. рисунок 3.19, таблицу 3.10). По результатам расчёта составили управляющую программу процесса РР. В связи с переменной кривизной рёбер, параметры обработки (давление в гидросистеме) будут регулироваться в соответствии с управляющей программой.

Дробеударное формообразование КПО выполним путём обработки его наружной стороны дробью диаметром 3,5 мм в программном режиме управления выполняли на УДФ-4 (см. рисунок 3.15). Предварительно были рассчитаны режимы ДУФ КПО, необходимые для получения поперечной кривизны КПО с радиусом $R_x = 6$ м: скорость подачи дробеметного аппарата $s = 850$ мм/мин; частота вращения дробеметного колеса диаметром 400 мм – $1\,000$ мин⁻¹. Результаты измерения стрелы f_y продольного прогиба до и после ДУФ представлены в таблице 3.10; результаты измерения стрелы f_x поперечного прогиба – в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Результаты измерения стрел прогиба в поперечном направлении в контрольных точках КПО с рёбрами Г-образного сечения после обработки в последовательности РР–ДУФ

| Контрольная точка | Стрела f_x прогиба на базе 200 мм, мм | | | Относительное отклонение, % |
|-------------------|---|----------|-----------|-----------------------------|
| | исходная | после РР | после ДУФ | |
| 1.1 | 0 | 0 | 0,8 | -4,0 |
| 1.2 | -0,01 | -0,01 | 0,79 | -5,2 |
| 1.3 | 0 | 0 | 0,8 | -4,0 |
| 1.4 | 0 | 0 | 0,81 | -2,8 |
| 2.1 | 0 | 0 | 0,82 | -1,6 |
| 2.2 | 0 | 0 | 0,8 | -4,0 |
| 2.3 | 0 | 0 | 0,76 | -8,8 |
| 2.4 | -0,01 | -0,01 | 0,86 | 3,2 |
| 3.1 | 0 | 0 | 0,86 | 3,2 |
| 3.2 | 0 | 0 | 0,79 | -5,2 |
| 3.3 | 0 | 0 | 0,8 | -4,0 |
| 3.4 | 0,01 | 0,01 | 0,81 | -2,8 |
| 4.1 | 0 | 0 | 0,79 | -5,2 |
| 4.2 | 0 | 0 | 0,81 | -2,8 |
| 4.3 | 0,01 | 0,01 | 0,8 | -4,0 |
| 4.4 | 0 | 0 | 0,76 | -8,8 |
| 5.1 | 0 | 0 | 0,77 | -7,6 |
| 5.2 | 0 | 0 | 0,78 | -6,4 |
| 5.3 | 0 | 0 | 0,79 | -5,2 |
| 5.4 | 0 | 0 | 0,8 | -4,0 |
| 6.1 | 0 | 0 | 0,79 | -5,2 |
| 6.2 | 0,01 | 0,01 | 0,81 | -2,8 |
| 6.3 | 0 | 0 | 0,76 | -8,8 |
| 6.4 | 0 | 0 | 0,81 | -2,8 |

Анализ результатов измерений показывает, что после обработки КПО панели с рёбрами Г-образного сечения в программном режиме управления в последовательности РР–ДУФ достигнута требуемая форма поверхности. В продольном направлении отклонение контура аэродинамической поверхности составляет не более 7 % (см. таблицу 3.10). При этом отклонение контура аэродинамической поверхности в поперечном направлении составляет не более 9 % (см. таблицу 3.11).

Из этого следует вывод, что разработанная методика расчета показывает достаточную сходимость и может быть использована при выполнении технологических расчётов применительно к реальным деталям с различными формами сечения ребра.

Выводы по главе

1. Создан расчётный метод определения режимов раскатки, основанный на установленной полиномиальной зависимости между деформационным фактором процесса (глубиной внедрения роликов) и регулировочными параметрами оборудования (диаметр роликов, давление и др.), который позволяет отказаться от трудоёмкого эмпирического подхода с опытной обработкой образцов и перейти к прямому назначению параметров на основе инженерного расчёта.

2. Разработанная методика подготовки исходных данных для расчёта режимов РР методом конечно-элементного моделирования позволяет формировать специализированные базы данных в виде тарировочных зависимостей величин прогиба расчётных участков от глубины внедрения роликов.

3. Достоверность методики расчёта подтверждена экспериментальным исследованием формообразования конструктивно подобных образцов панелей с рёбрами прямоугольного и Г-образного сечений при выполнении операций в последовательности РР–ДУФ. Установлено, что форма сечения ребра не оказывает существенного влияния на результаты технологических расчётов. Максимальные отклонения не превышают 6–7% в продольном и 9% в поперечном направлении как для прямых, так и для Г-образных рёбер.

4 Практическая реализация результатов исследования

4.1 Методика расчета технологических параметров процесса раскатки рёбер при формообразовании панелей в последовательности РР–ДУФ

Целью расчета технологических параметров раскатки рёбер роликами, применяемой в комбинированном процессе формообразования панелей, является определение настроечных параметров оборудования. В диссертационной работе задействована установка для формообразования и правки УФП-1, разработанная в ИРНИТУ. Регулируемыми технологическими параметрами процесса РР являются сила сжатия роликов, длина обрабатываемого участка ребра и расположение роликов по высоте ребра. Блок-схема расчета режимов обработки показана на рисунке 4.1.

При выполнении расчетов оси Y и X располагаются на аэродинамической поверхности детали, в продольном и поперечном направлениях соответственно; ось Z – вглубь металла по нормали к аэродинамической поверхности. Исходными данными для расчёта технологических параметров процесса РР являются:

– электронная модель и технологической электронной модели панели, содержащая необходимую геометрическую информацию. Электронная модель панели отражает окончательные форму и размеры изделия, перед сборкой, а технологическая модель панели представляет собой деталь с плоской аэродинамической поверхностью, предназначенную для фрезерования и последующего формообразования;

– результаты определения режимных параметров и внутренних силовых факторов процесса ДУФ (см. п. 2.2); кривизна, формируемая операцией ДУФ, считается положительной;

– тарировочное уравнение (3.3), связывающее глубину S внедрения роликов в материал детали с регулировочными параметрами технологического оборудования;

– предварительные результаты измерения кривизны панели в продольном направлении (производится в вертикальном положении).

Расчет технологических параметров процесса РР панели проводился в определенной последовательности.

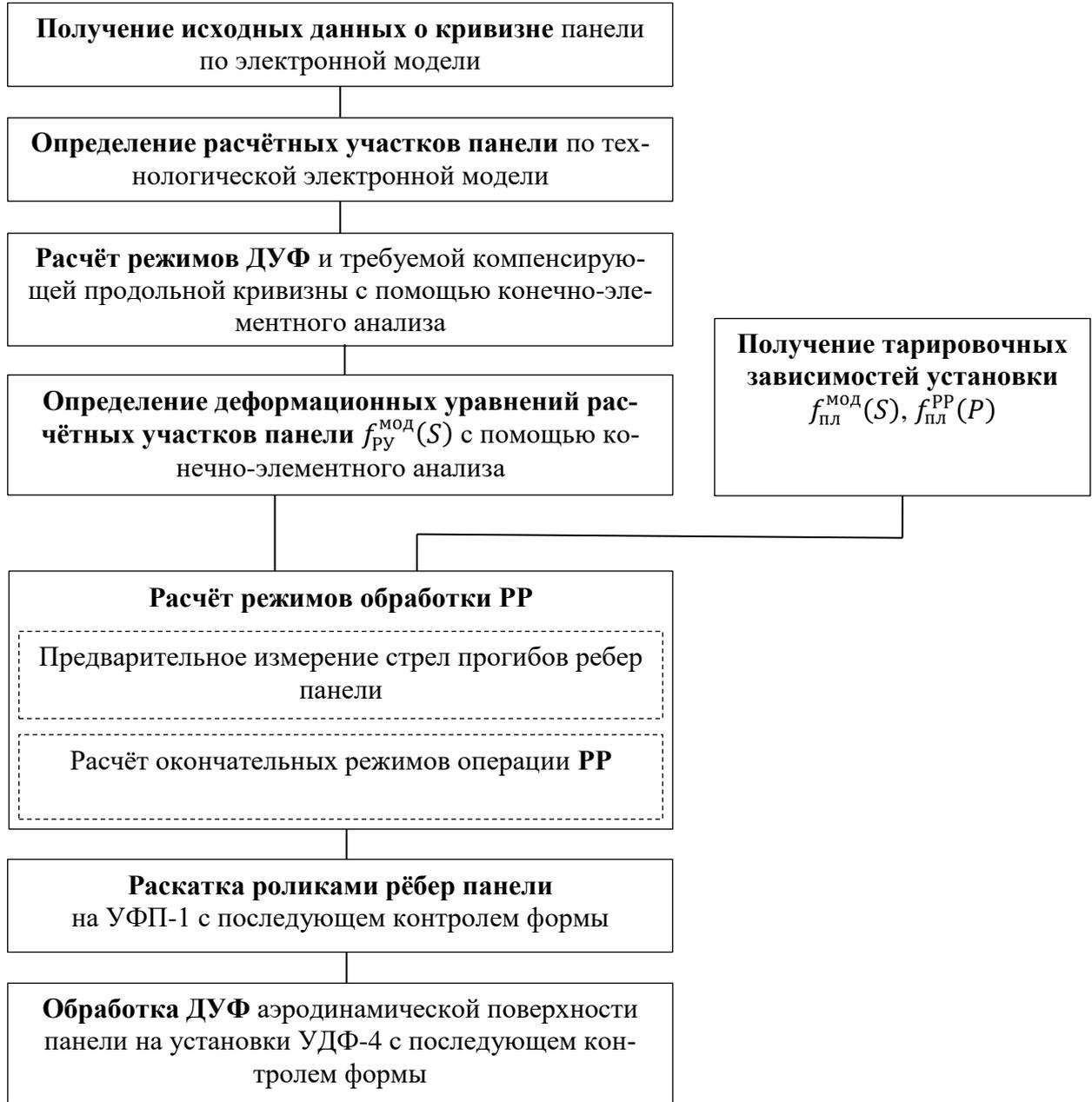


Рисунок 4.1– Блок-схема последовательности действий расчета режимов и обработки при формообразовании в последовательности РР–ДУФ

По формуле (4.1) вычисляем значение продольной кривизны k_y^{PP} ($k = 1/R$; R – радиус кривизны), подлежащей образованию при РР:

$$k_y^{mp} = k_y^{ДУФ} + k_y^{PP}, \quad (4.1)$$

где k_y^{mp} – требуемое значение продольной кривизны образуемого участка панели;
 $k_y^{ДУФ}$ – продольная кривизна, образуемая при ДУФ.

Для определения радиусов кривизны детали проводили анализ линий, лежащих на аэродинамической поверхности ЭМД и являющимися проекциями осей рёбер (рисунок 4.2). Визуальное распределение радиусов кривизны продольных и поперечных сечений детали (по кривизне поперечных сечений определяются параметры процесса ДУФ) показано на рисунке 4.3.

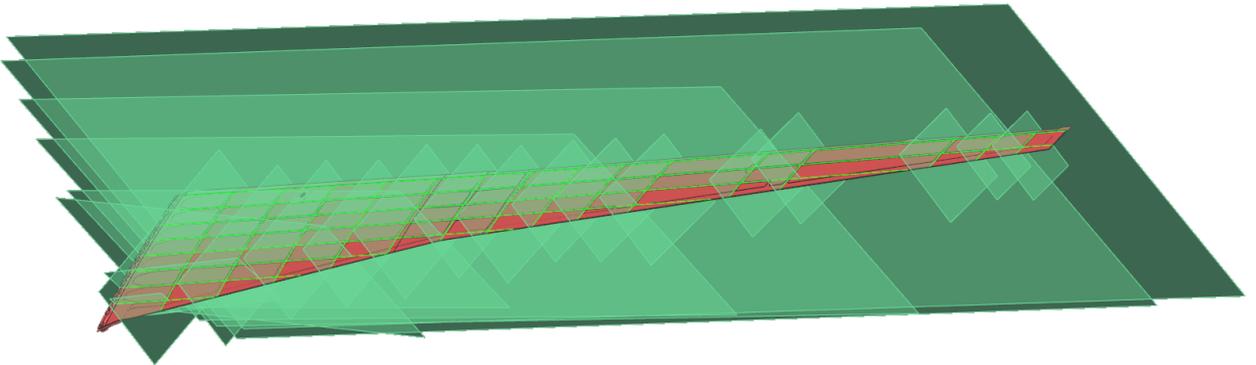


Рисунок 4.2 – Построение продольных и поперечных сечений на ЭМД

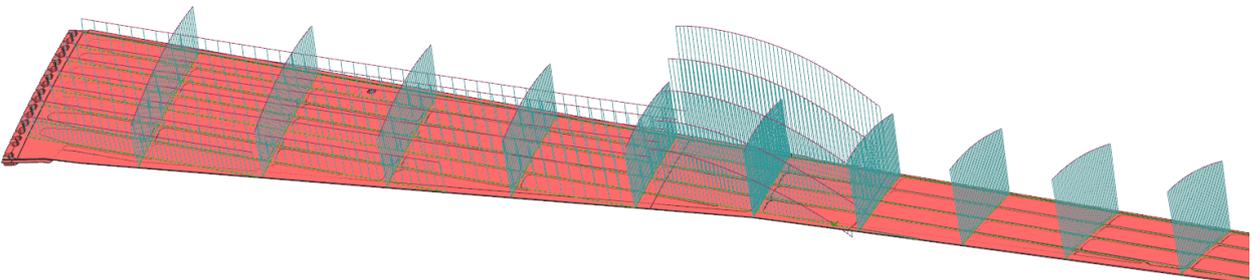


Рисунок 4.3 – Графики распределения радиусов кривизны в продольном и поперечном направлениях

Было выполнено членение ЭМД панели на РУ, представляющие собой ребро с прилегающими к нему участками полотна шириной, равной расстоянию между соседними рёбрами или до края детали (рисунок 4.4). Длины РУ определяли, устанавливая диапазоны изменения продольной кривизны и жесткости РУ таким образом, чтобы обеспечить требуемую точность формообразования при обработке (раскатке ребра) РУ с неизменными режимами.

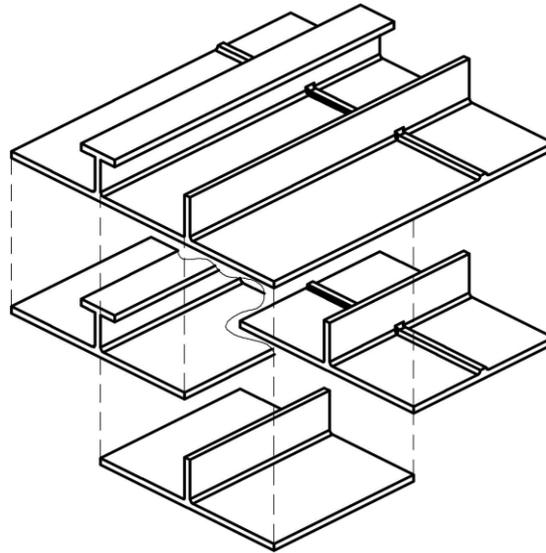


Рисунок 4.4 – Разбиение панели на расчетные участки

Создали КЭМ РУ, для этого с помощью штатных средств САД системы снимали размеры с модели детали (рисунок 4.5).

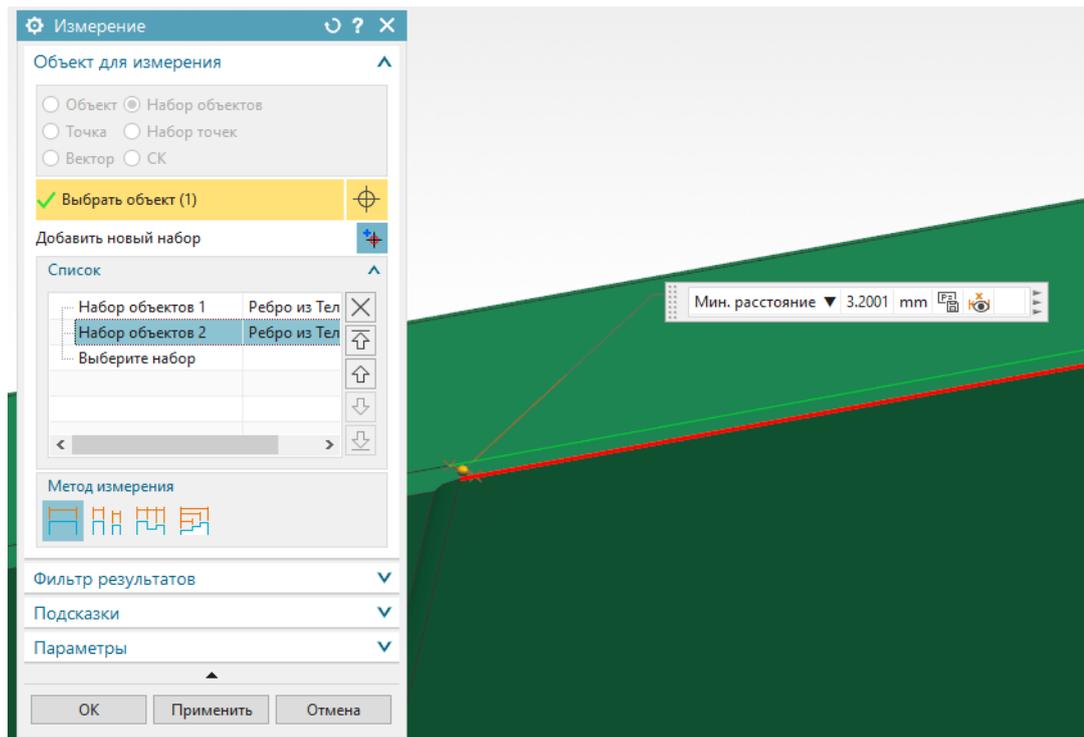


Рисунок 4.5 – Измерение размеров элементов детали

Размеры РУ заносили в модуль разработанной специальной программы для создания расчетных файлов моделирования процесса РР в системе LS-Dyna [79]. Программа написана на языке программирования Python; её интерфейс показан на рисунке 4.6.

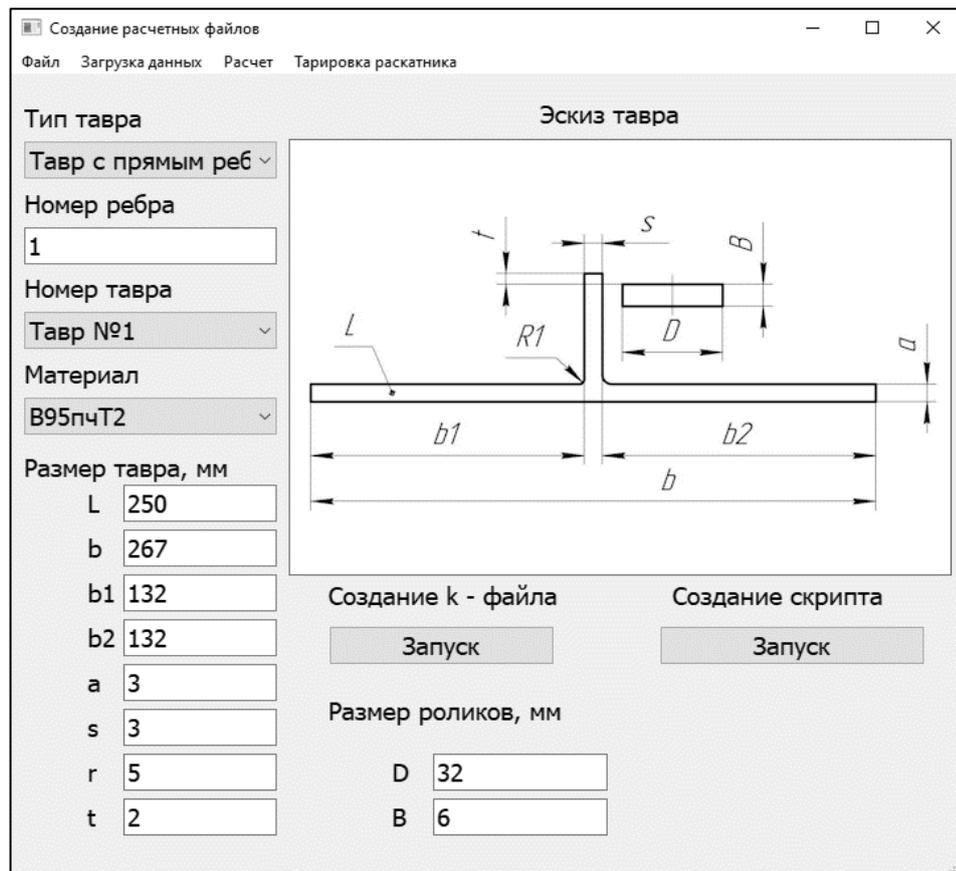


Рисунок 4.6 – Интерфейс программы создания расчетных файлов для LS-Dyna

Программа предназначена для автоматизации создания расчётных файлов LS-DYNA, запуска расчётов на сервере и последующей обработки результатов с целью получения деформационных уравнений РУ и подбора режимов обработки на УФП-1. Более подробно процесс работы программы описан в следующем разделе.

4.2 Описание расчетной программы

Программа, разработанная для расчёта режимов раскатки рёбер детали, выполняет следующие функции:

1. Создание расчетных файлов для расчёта процесса РР. Размер конечно-элементной сетки и параметры моделирования устанавливаются из расчетного файла, прошедшего валидацию. Размеры образца и роликов определяются пользователем путем внесения требуемых значений в интерфейс приложения (см. рисунок 4.6). На

основе введенных значений генерируется конечно-элементная сетка путем создания карт узлов и элементов (рисунки 4.7, 4.8). Карта узлов состоит из номера узла и координат в системе X, Y, Z; карта элементов – из номера элемента, номера объекта и номеров узлов, которые его формируют.

| *NODE | | | | | | |
|--------|-----|------|-------|-----|----|----|
| \$# | nid | x | y | z | tc | rc |
| 586480 | | -1.5 | 250.0 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586481 | | 1.5 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586482 | | -1.5 | 249.5 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586483 | | 1.5 | 0.5 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586484 | | -1.5 | 249.0 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586485 | | 1.5 | 1.0 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586486 | | -1.5 | 248.5 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586487 | | 1.5 | 1.5 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586488 | | -1.5 | 248.0 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586489 | | 1.5 | 2.0 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586490 | | -1.5 | 247.5 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586491 | | 1.5 | 2.5 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586492 | | -1.5 | 247.0 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586493 | | 1.5 | 3.0 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586494 | | -1.5 | 246.5 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586495 | | 1.5 | 3.5 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586496 | | -1.5 | 246.0 | 0.0 | 0 | 0 |
| 586497 | | 1.5 | 4.0 | 0.0 | 0 | 0 |

Рисунок 4.7 – Карта узлов расчетного файла

| *ELEMENT_SOLID | | | | | | | | | | |
|----------------|-----|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| \$# | eid | pid | n1 | n2 | n3 | n4 | n5 | n6 | n7 | n8 |
| 454125 | | 2 | 606369 | 606370 | 606869 | 606868 | 607021 | 607022 | 607023 | 607024 |
| 454126 | | 2 | 607021 | 607022 | 607023 | 607024 | 607025 | 607026 | 607027 | 607028 |
| 454127 | | 2 | 607025 | 607026 | 607027 | 607028 | 607029 | 607030 | 607031 | 607032 |
| 454128 | | 2 | 607029 | 607030 | 607031 | 607032 | 607033 | 607034 | 607035 | 607036 |
| 454129 | | 2 | 607033 | 607034 | 607035 | 607036 | 607037 | 607038 | 607039 | 607040 |
| 454130 | | 2 | 607037 | 607038 | 607039 | 607040 | 607041 | 607042 | 607043 | 607044 |
| 454131 | | 2 | 607041 | 607042 | 607043 | 607044 | 607045 | 607046 | 607047 | 607048 |
| 454132 | | 2 | 607045 | 607046 | 607047 | 607048 | 607049 | 607050 | 607051 | 607052 |
| 454133 | | 2 | 607049 | 607050 | 607051 | 607052 | 607053 | 607054 | 607055 | 607056 |
| 454134 | | 2 | 607053 | 607054 | 607055 | 607056 | 607057 | 607058 | 607059 | 607060 |
| 454135 | | 2 | 607057 | 607058 | 607059 | 607060 | 607061 | 607062 | 607063 | 607064 |
| 454136 | | 2 | 607061 | 607062 | 607063 | 607064 | 607065 | 607066 | 607067 | 607068 |
| 454137 | | 2 | 607065 | 607066 | 607067 | 607068 | 607069 | 607070 | 607071 | 607072 |
| 454138 | | 2 | 607069 | 607070 | 607071 | 607072 | 607073 | 607074 | 607075 | 607076 |
| 454139 | | 2 | 607073 | 607074 | 607075 | 607076 | 607077 | 607078 | 607079 | 607080 |
| 454140 | | 2 | 606114 | 606115 | 606614 | 606613 | 607081 | 607082 | 607083 | 607084 |
| 454141 | | 2 | 607081 | 607082 | 607083 | 607084 | 607085 | 607086 | 607087 | 607088 |
| 454142 | | 2 | 607085 | 607086 | 607087 | 607088 | 607089 | 607090 | 607091 | 607092 |
| 454143 | | 2 | 607089 | 607090 | 607091 | 607092 | 607093 | 607094 | 607095 | 607096 |

Рисунок 4.8 – Карта элементов расчетного файла

2. Создание скрипта по запуску расчётных файлов на сервере с последующей обработкой. Скрипт дублирует расчётный файл расчёта РР с изменением глубины внедрения роликов и их месторасположения относительно РУ детали. Данные параметры задаются пользователем в основном интерфейсе программы. Затем выполняется последовательный запуск расчётных файлов с проверкой корректности выполнения расчёта. На следующем этапе из файлов с результатами моделирования извлекаются элементы сетки для построения аппроксимирующих уравнений, связывающих деформацию образца с глубиной внедрения роликов. Интерфейс программы настройки скрипта представлен на рисунке 4.9.

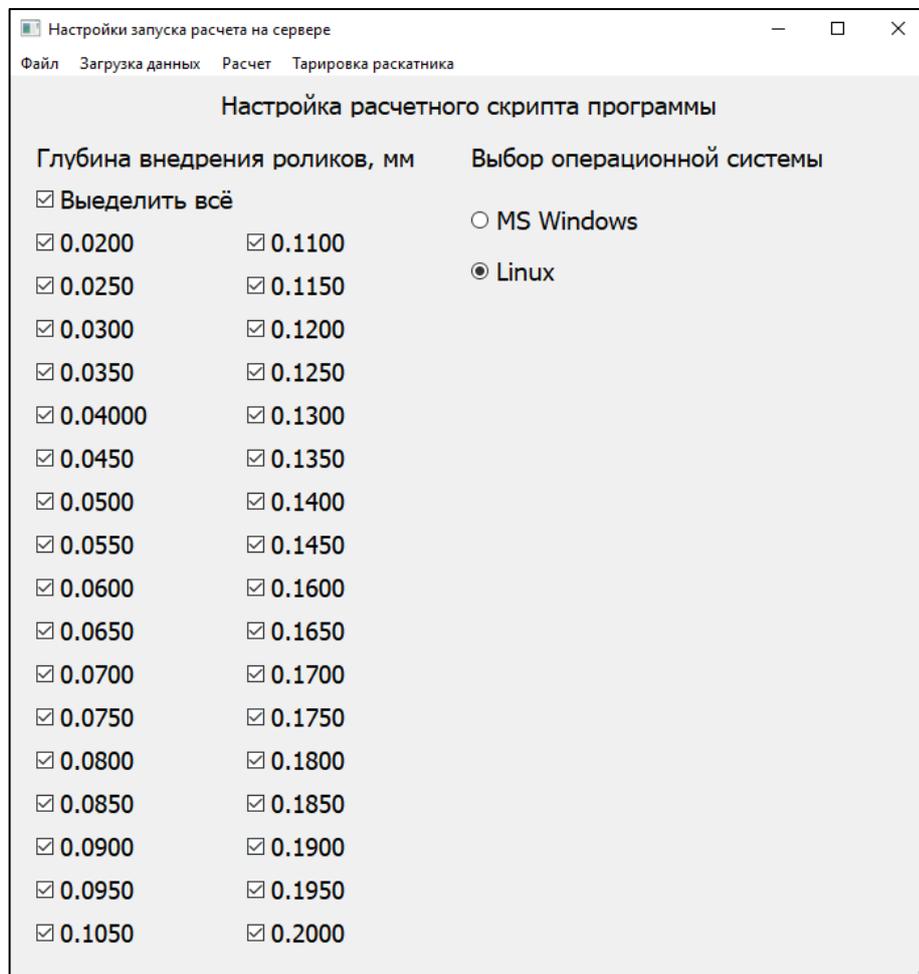


Рисунок 4.9 – Интерфейс программы настройки скрипта запуска расчетных файлов на сервере

3. Подбор режимов обработки по тарифовочному и аппроксимирующим уравнениям. Пользователь вводит данные по исходной и конечной деформации ребра

панели. Программа (рисунок 4.10) на основе полученных зависимостей и требуемых деформаций рассчитывает режимы обработки (расположение роликов относительно ребра, давление в гидросистеме сжатия роликов и длину зоны обработки).

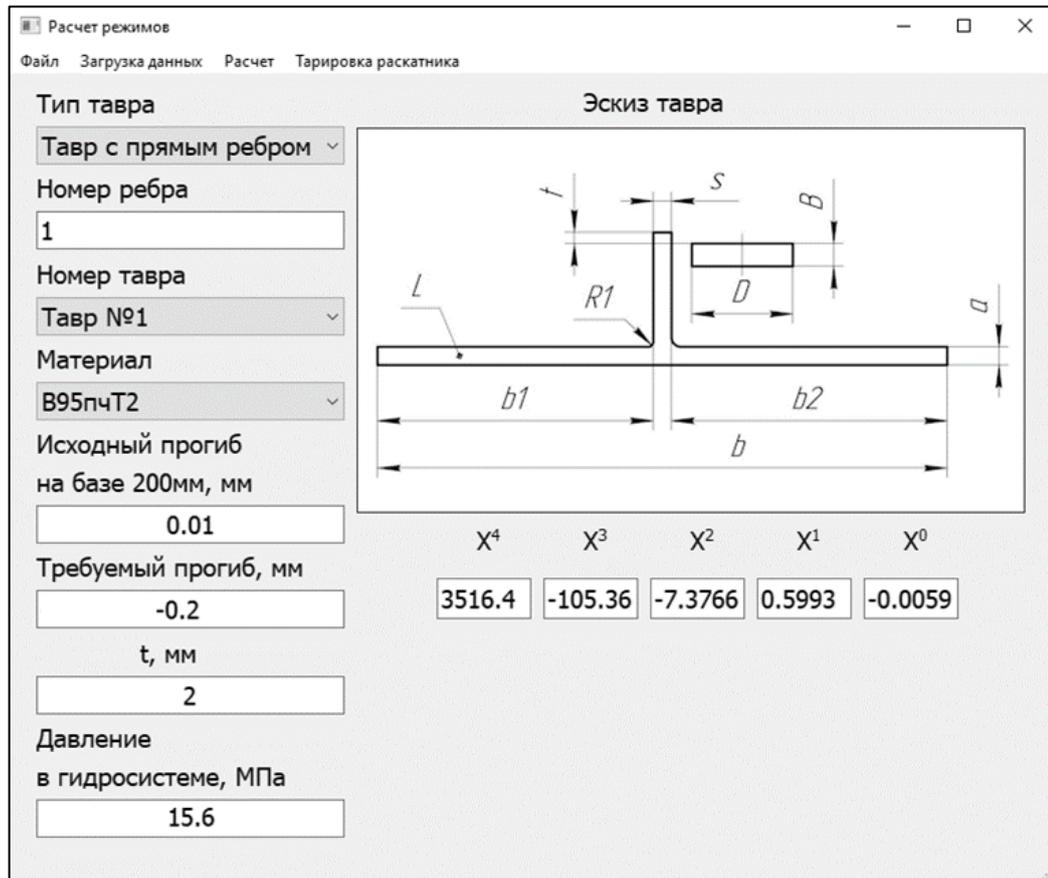


Рисунок 4.10 – Интерфейс программы по расчету режимов обработки

После выполнения расчета создаётся управляющая программа для УФП-1:

N1X250F100P10E15.4

N1X200F50P10E5.8

N1X250F100P10E12.3

MES («N2») // программный останов и информационное окно “Переместить на ребро №2”

N2X250F100P10E12.9

...

Здесь N – номер ребра; X – длина участка обработки; F – подача, мм/мин; P – давление в начале участка, МПа; E – давление в конце участка, МПа.

В процессе работы формируется база данных аппроксимирующих уравнений различных РУ, что позволяет отказаться от повторных расчётов.

На программное обеспечение получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (см. Приложение Б).

4.3 Разработка оборудования с ЧПУ для раскатки рёбер монолитнофрезерованных панелей

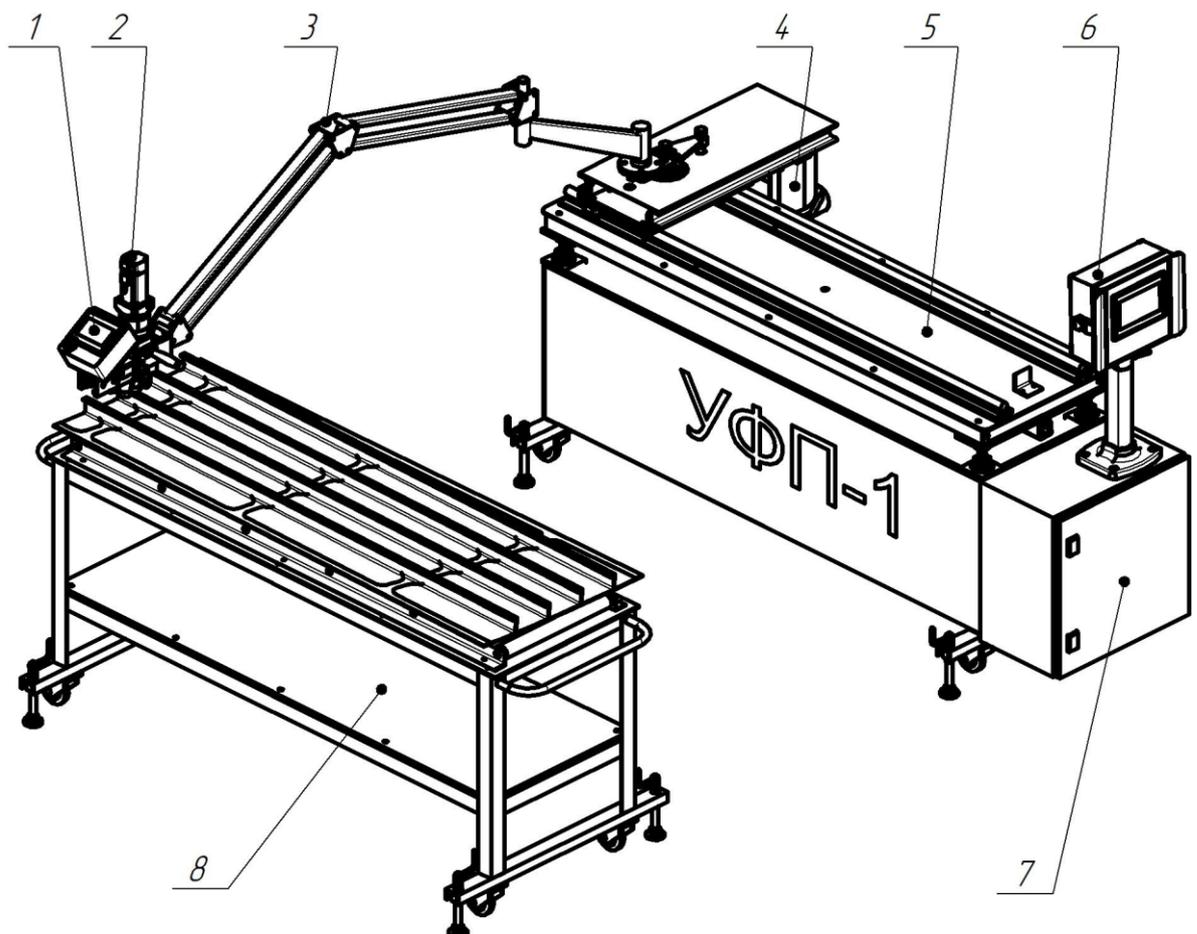
В настоящее время в отрасли отсутствует специализированное оборудование для выполнения автоматизированной раскатки рёбер длинномерных панелей. В связи с этим была поставлена и решена задача разработки такого оборудования и технологических приёмов для раскатки рёбер монолитнофрезерованных панелей переменной кривизны. В рамках совместных комплексных проектов ПАО “Яковлев” и ФГБОУ ВО ИРНИТУ была разработана специализированная установка для формообразования и правки УФП-1. Основные технические характеристики установки приведены в таблице 4.1, общий вид показан на рисунках 4.11, 4.12.

Таблица 4.1 – Основные технические характеристики УФП-1

| Наименование параметров | Ед. изм. | Значение |
|--|-------------------|----------|
| Максимальная ширина обрабатываемых деталей | мм | 1 000 |
| Толщина рёбер, обрабатываемых на установке | мм | 2–15 |
| Количество приводных роликов | шт. | 2 |
| Диаметр роликов | мм | 32; 64 |
| Ширина роликов | мм | 15 |
| Максимальное усилие сжатия роликов, не менее | кН | 25 |
| Максимальная частота вращения роликов | мин ⁻¹ | 60 |
| Частота вращения электродвигателя | мин ⁻¹ | 6 000 |
| Требуемое давление в сети сжатого воздуха | МПа | 0,5 |
| Давление рабочей жидкости установки, в диапазоне | МПа | 0,5–24 |
| Точность позиционирования рабочего органа | мм | ±0,5 |
| Перемещения рабочего органа в пределах, направляющих стола | мм | 1 000 |
| Погрешность регулирования давления в гидроцилиндре | МПа | 0,2 |
| Максимальный мгновенный расход воздуха | м ³ /с | 0,01 |
| Напряжение сети питания | В | 220±10 % |
| Суммарная мощность установки, не более | кВт | 2,5 |



Рисунок 4.11 – Установка для формообразования и правки раскаткой
роликами УФП-1



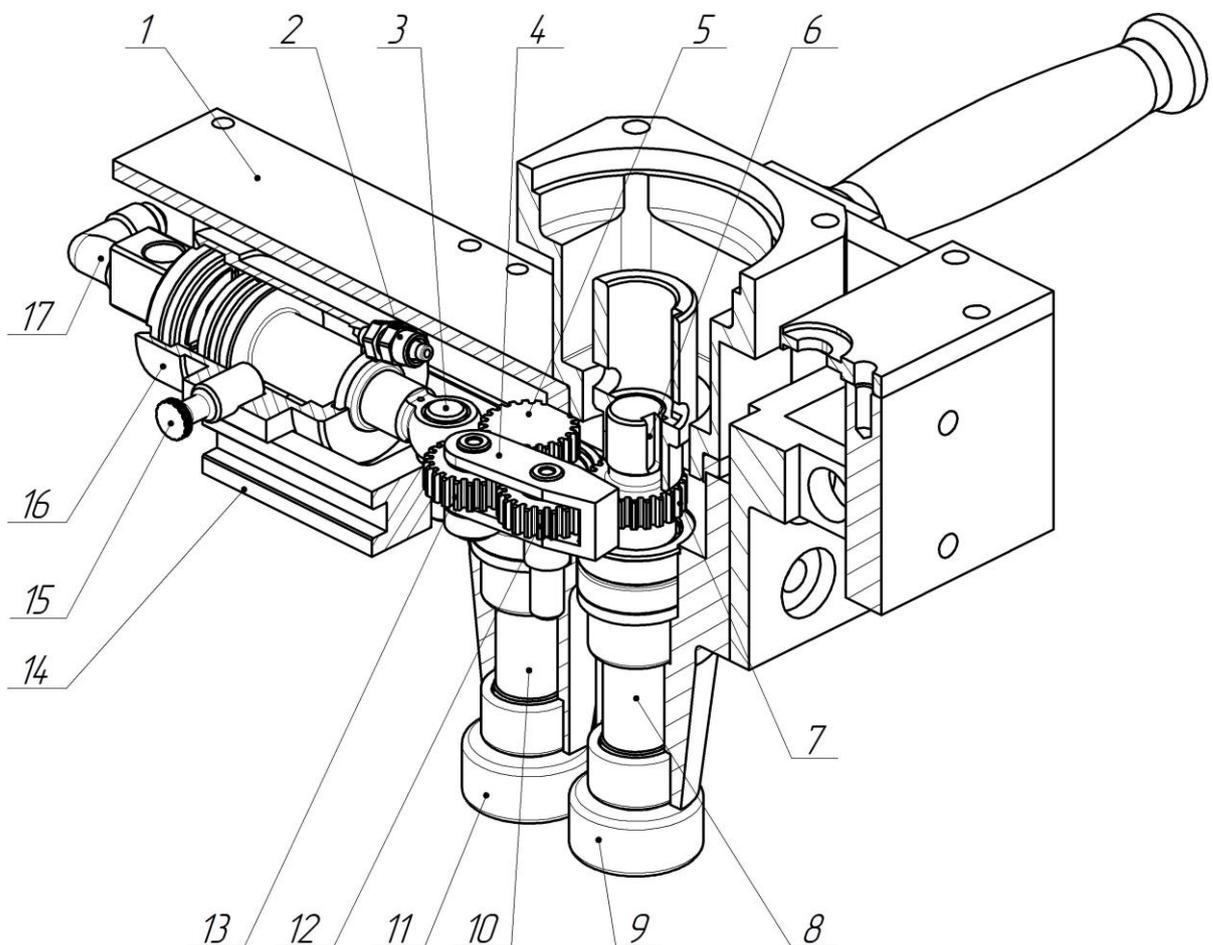
1, 6 – панели оператора; 2 – раскатная головка; 3 – манипулятор рычажного типа;
4 – мультипликатор; 5 – стол-тележка с направляющими; 7 – шкаф управления; 8 – стол-
тележка с рольгангом

Рисунок 4.12 – Схема УФП-1

Установка для формообразования и правки раскаткой роликами может применяться в технологических процессах:

- комбинированного формообразования деталей типа монолитнофрезерованных продольно оребрѐнных панелей;
- правки подкреплѐнных деталей каркаса для устранения коробления, возникшего в результате механической обработки.

Рабочим органом УФП-1 является раскатная головка 2 (см. рисунок 4.12). Еѐ сборочный чертѐж в изометрии показан на рисунке 4.13. Раскатная головка имеет



- 1 – корпус; 2 – штуцер пневматический; 3 – зацеп; 4 – качалка; 5, 7 – шестерни, 6 – шпонка;
 8, 10 – валы; 9, 11 – ролики; 12, 13 – паразитные шестерни; 14 – ползун;
 15 – фиксатор; 16 – гидроцилиндр; 17 – штуцер гидравлический

Рисунок 4.13 – Раскатная головка

приводные ролики 9, 11, закрепленные на валах 8, 10. Валы установлены в корпусе 1 и ползуне 14 на подшипниках качения. На валах с противоположной стороны от

роликов вмонтированы шестерни 5, 7. Вращения роликов 9, 11 осуществляется с помощью электродвигателя с планетарным редуктором (на рисунке не показаны), вращение вала 8 – напрямую от редуктора через шпонку 6; вращение вала 10 – с помощью шестерен 5, 7 и паразитных шестерен 12, 13 установленных в качалке 4. Задача качалки 4 – передавать вращение ролику 11 вне зависимости от его расположения. Сжатие роликов происходит с помощью силового одноштокового гидроцилиндра 16 двустороннего действия, соединенного с ползуном 14 через зацеп 3. При сжатии давление в гидроцилиндр подается через штуцер 17, на обратный ход – через штуцер 3. Гидроцилиндр 16 закреплен в корпусе 1 с помощью фиксаторов 15. Ролики 9, 11 являются сменными, изготовлены диаметром 32 и 64 мм.

Манипулятор рычажного типа 3 (см. рисунок 4.12) на УФП-1 обеспечивает перемещение рабочего органа в поперечном направлении за счет изменения угла между рычагами; фиксация осуществляется с помощью пневмозажимов. Манипулятор (рисунок 4.14) имеет возможность обработки неподвижных крупногабаритных деталей, расположенных выше уровня стола установки (например, в закрепленных в оснастке: на стапеле, контрольном столе и т.д.).

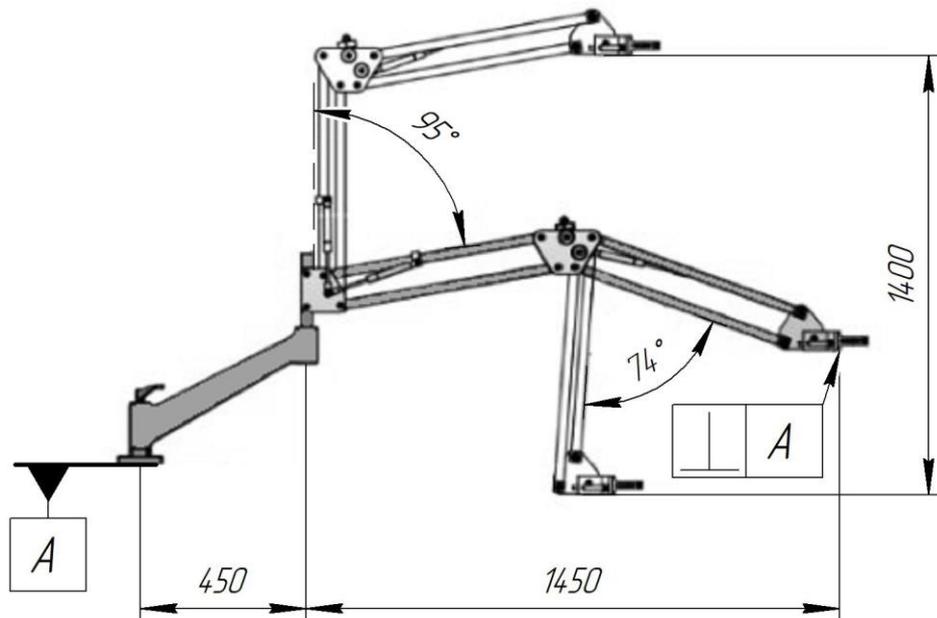
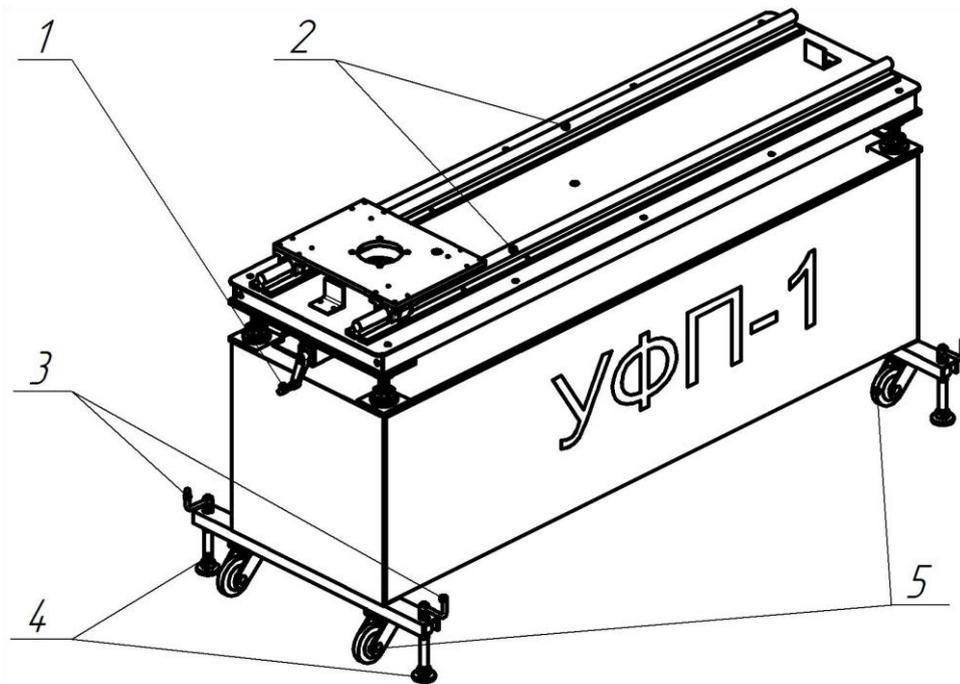


Рисунок 4.14 – Механизм продольно-поперечного перемещения рычажного типа на УФП-1

Мультипликатор – пневмогидроусилитель 4 (см. рисунок 4.12) на УФП-1 служит для создания необходимого давления рабочей жидкости в гидроцилиндре раскатной головки путем усиления входящего давления сжатого воздуха из заводской сети. Стол-тележка 8 (см. рисунок 4.12) служит для размещения всех механизмов и систем установки, а также перемещения ее в межцеховом пространстве (рисунок 4.15).

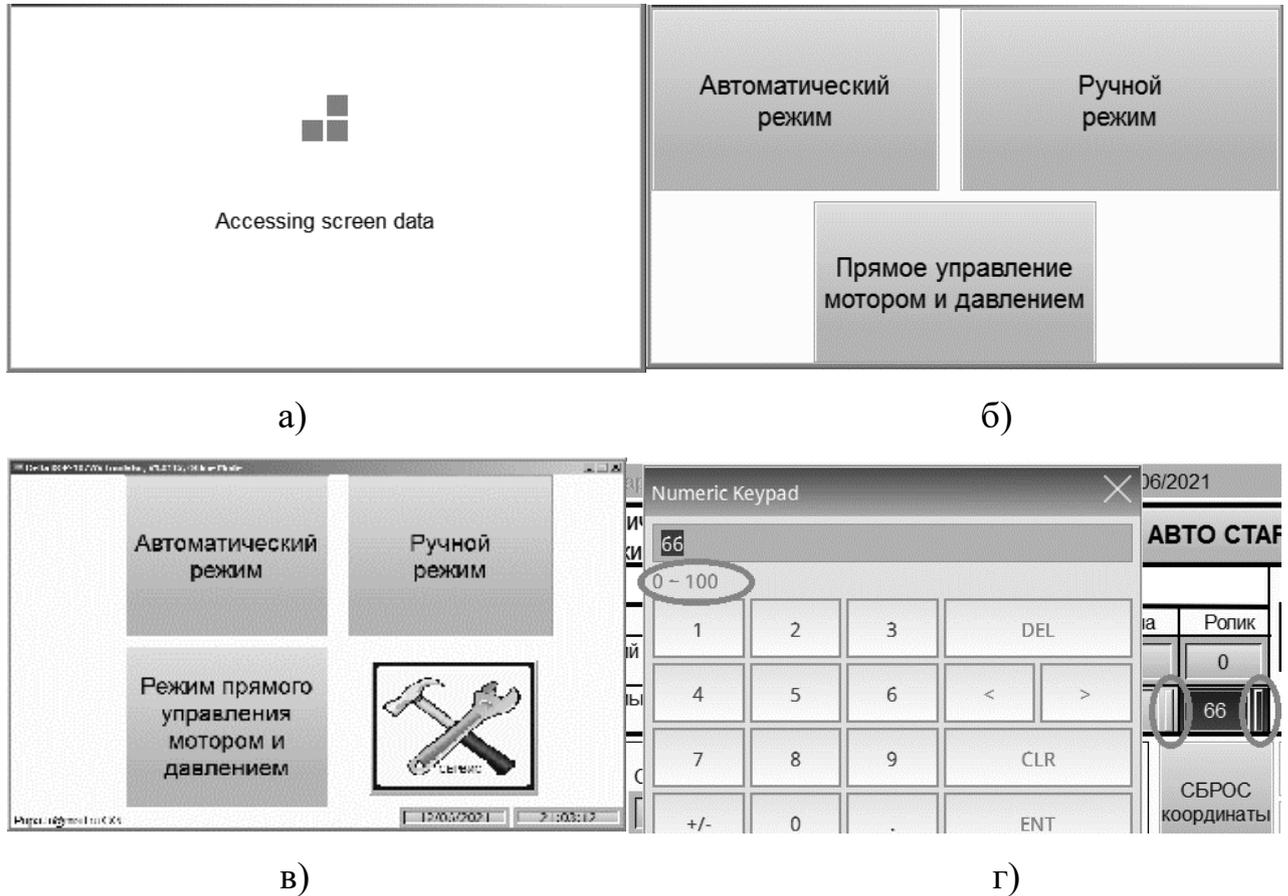


1 - ручка; 2 – рукоятка; 3 – направляющая; 4 – рукоятка; 5 – опора; 6 – колесная пара

Рисунок 4.15 – Стол-тележка с направляющими

При выполнении работы имеется возможность блокировки колес 4 путём выставления упоров 4 вращением рукояток 3, а также регулирования стола по высоте вращением рукоятки 1. В качестве направляющих используются два высокоточных стальных вала 2 с опорными рейками фирмы Rexroth Bosch Group. Шкаф управления содержит систему управления технологическими параметрами процесса РР (частотой вращения роликов, силой сжатия, позицией, номером кадра и программой, в разных режимах работы). Стол-тележка с рольгангом (на рисунках не представлена) предназначена для установки и перемещения легких деталей в процессе правки. Установка для формообразования и правки оснащена двумя графическими сенсорными панелями: основная (стационарная) и малая, расположена на рабочем органе – раскатной головке. Основная панель 6 (см. рисунок 4.12) предназначена

для отображения всех параметров установки, включая служебные и сервисные. Вспомогательная малая панель 1 (см. рисунок 4.12), находясь непосредственно перед оператором во время работы, отображает текущий режим работы. Примеры экранов панелей оператора представлены на рисунке 4.16.



а – момент начальной загрузки; б – основное меню малой панели; в – основное меню основной большой панели; г – элемент ввода и окно ввода данных

Рисунок 4.16 – Интерфейс программы на пульте управления УФП-1

Управление осуществляется с помощью сенсорных клавиш. Интерфейс программы позволяет реализовать функции по загрузке и редактированию программы, вводу данных с технологической карты, просмотр установок и др.

Работа УФП-1 осуществляется в ручном и автоматическом режимах. В ручном режиме задаются давление в гидросистеме и скорость вращения роликов; место и длина обработки определяются оператором. Интерфейс ручного режима представлен на рисунке 4.17.

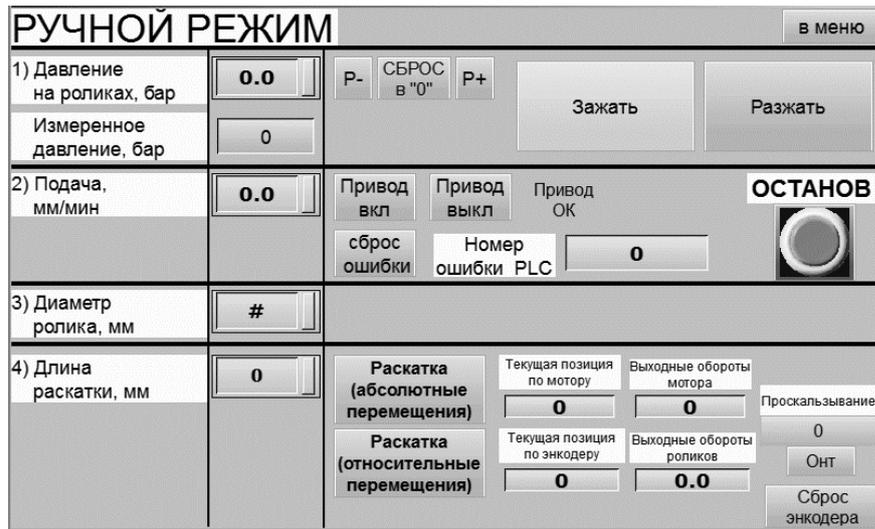


Рисунок 4.17 – Интерфейс ручного режима управления УФП-1

Автоматический режим предназначен для внесения режимов управляющей программы для каждого участка обработки (рисунок 4.18).



Рисунок 4.18 – Интерфейс автоматического режима управления УФП-1

С технологической карты оператором вносятся следующие параметры: номер ребра, длина обработки, давление в начале участка, давление в конце участка, подача.

4.4 Разработка технологического процесса формообразования в последовательности раскатка рёбер – ДУФ

Раскатка рёбер монолитнофрезерованных панелей выполняется для создания продольной кривизны с компенсацией продольной компоненты двухосного изгиба детали, возникающего при ДУФ. Раскатка роликами осуществляется от периферийных рёбер к центральным путем последовательного выполнения рабочих циклов в соответствии с картой эскизов технологического процесса (рисунок 4.19). На карте обозначены область перегиба (L_1) и области с линейчатой формой поверхности детали (L_2 и L_3). Каждая из указанных областей разбивается на участки, нумеруемые в соответствии с последовательностью реализации процесса раскатки. В связи с переменной кривизной рёбер давление в гидросистеме корректируется по управляющей программе в процессе обработки. Далее, на основе карты эскиза на внутреннюю поверхность полотна панели наносятся риски. Ориентируясь на них, производится установка роликов раскатной головки УФП-1.



Рисунок 4.19 – Пример эскиза к операции раскатки рёбер панели

Раскатка рёбер роликами реализуется на УФП-1 следующим образом:

1. Деталь устанавливается на контрольном столе (стапеле) вне установки или на столе с рольгангами УФП-1.

2. Выполняется раскатка роликами на требуемых участках рёбер детали в программном или ручном режимах. Процесс осуществляется в два этапа: на первом достигается кривизна контура, составляющая 70–90 % от требуемой, на втором формируется окончательная кривизна.

3. Производится контроль геометрической формы детали в вертикальном положении путём измерения стрелы прогиба детали в продольном направлении. Результаты заносятся в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Значения стрелы прогиба в продольном направлении после раскатки роликами рёбер

В миллиметрах

| Нервюра | Стрингер | | | | | | | Примечание |
|---------|----------|---|---|---|---|---|---|------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | |

4. Операция ДУФ выполняется на установках контактного типа серии УДФ. Дробемётный аппарат перемещается относительно детали; деталь, в свою очередь, размещается неподвижно. В процессе обработки на УДФ-4 панель находится в вертикальном положении в системе фиксации, которая обеспечивает её соответствие продольному теоретическому контуру. Система фиксации установки снабжена механизмами поперечного перемещения для обеспечения положения детали. Сначала обрабатываются более жесткие участки поверхности, затем менее жесткие (обработка должна проводиться от периферии детали к её центру). Затем панель подвергается зачистке для достижения требуемой шероховатости на поверхностях после дробеударной обработки [14, 37, 69, 92].

Операция ДУФ состоит из двух этапов: предварительное и окончательное формообразование. На первом этапе достигается кривизна контура, составляющая 60 – 80 % от требуемой, а на втором этапе формируется окончательная кривизна.

В серийном производстве предварительное формообразование выполняется в автоматизированном режиме управления. Обработка начинается с корневой части (так как она более жесткая), а затем – последовательно по сечениям. По окончании каждого рабочего хода измеряются стрелы прогиба в контрольных точках сечений (это те точки, которые располагаются на пересечении осей стрингеров и нервюр). Окончательный этап формообразования осуществляется в ручном режиме управления, который сопровождается контролем отклонений от теоретического контура детали после каждого рабочего хода. Назначение режимов обработки при окончательном этапе формообразования происходит следующим образом: частота вращения дробеметного аппарата при обработке определенного участка остается такой же, как и на этапе предварительного формообразования; подача перемещения дробеметного аппарата увеличивается в два раза.

Контроль поперечного контура на окончательном этапе ДУФ производится с помощью шаблонов контура сечения, величина отклонения – с помощью щупов. Результаты измерений отклонений обводов контура заносятся в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Отклонения обводов контура

| Нервюра | Стрингер | Характеристика отклонений | | | |
|---------|----------|--------------------------------------|------------------------------|------------------|-----------------|
| | | Отклонения в свободном состоянии, мм | Отклонения под нагрузкой, мм | База прижима, мм | Масса груза, кг |
| 1 | 1 | | | | |
| | 2 | | | | |
| | 3 | | | | |
| | ... | | | | |
| 2 | 1 | | | | |
| | 2 | | | | |
| | 3 | | | | |
| | ... | | | | |
| ... | ... | | | | |

При выполнении контроля необходимо ослабить усилие прижима, сохраняя настройку механизмов поперечного перемещения зажимного приспособления. Окончательный контроль формы аэродинамической поверхности панели выполняется на контрольном стапеле с измерением отклонений с помощью щупов.

Данная методика формообразования продольно-оребрённых панелей комбинированным методом “раскатка роликами – дробеударное формообразование” успешно внедрена в производственный процесс на оборудовании с ЧПУ, что подтверждается разработанным комплектом нормативно-технической и рабочей технологической документации (см. Приложение Б).

Выводы по главе

На основе методик и результатов конечно-элементного моделирования процесса РР, представленных в главах 2 и 3, разработаны подходы к реализации технологического сочетания РР–ДУФ на оборудовании с ЧПУ.

1. Разработан алгоритм и программное обеспечение для автоматизированного расчёта и реализации режимов раскатки в рамках технологии РР–ДУФ. Обоснована, что в качестве исходных данных необходимо использовать ЭМД панели, результаты моделирования её деформации после ДУФ и тарировочные уравнения, связывающие глубину внедрения роликов с регулировочными параметрами оборудования. На основе метода конечно-элементного моделирования с автоматизированной подготовкой данных определяются режимы обработки (расположение роликов, давление в гидросистеме, длина зоны обработки) и формируется управляющая программа для УФП-1 с ЧПУ.

2. Доказано, что комплекс для формообразования подкреплённых панелей, включающий УФП-1 с ЧПУ, является эффективной основой для формирования технологических рекомендаций по его практическому применению.

Заключение

В диссертационной работе решена актуальная для машиностроительной отрасли научно-техническая задача, направленная на совершенствование технологии производства крупногабаритных монолитно-фрезерованных панелей сложной формы с продольным оребрением. В работе достигнута цель по совершенствованию комбинированной технологии РР–ДУФ. Разработана достоверная методика расчёта технологических параметров с использованием САЕ систем и автоматизированного оборудования, что обеспечило повышение эффективности производства и качества деталей.

В результате выполненного исследования получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработана методика определения исходных данных для расчёта технологических параметров процесса формообразования панелей раскаткой роликами рёбер. Методика основана на прогнозировании продольной компоненты двухосного изгиба от последующей дробеударной обработки с целью компенсации технологической наследственности.

2. Предложен метод определения режимов ДУФ расчётных участков детали, основанный на переборе значений внутренних силовых факторов (удельных растягивающих сил с учётом координат точек их приложения) из базы данных. База данных сформирована по результатам конечно-элементного моделирования процесса ДУФ с различными режимами обработки.

3. Оценено взаимовлияние соседних рёбер панели при их последовательной раскатке роликами и обоснована возможность расчёта параметров процесса РР на РУ, представляющих собой ребро с прилегающими участками полотна шириной до соседнего ребра или края детали.

4. Разработана методика и выполнено моделирование процесса РР с применением систем нелинейного конечно-элементного анализа для изучения законо-

мерностей формирования НДС детали. Установлено, что область пластического течения в процессе РР может распространяться по всей толщине обрабатываемых рёбер. Достоверность моделирования подтверждена сравнением полученных эпюр остаточных напряжений, и эпюр, полученных при исследовании технологических образцов механическим методом (метод полосок Н.Н. Давиденкова).

5. Разработана методика определения режимов обработки на операции раскатки роликами рёбер панелей, путём конечно-элементного моделирования на образцах в виде РУ деталей взамен их опытной обработки. Для этого создана расчётная модель на основе тарировочной зависимости между глубиной внедрения роликов и регулировочными параметрами оборудования, которая позволяет формировать базы данных в виде зависимостей стрел прогибов РУ от глубины внедрения роликов.

6. Разработано специализированное программное обеспечение, автоматизирующее расчёт режимов РР и генерацию управляющих программ обработки РУ. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

7. Достоверность результатов расчёта технологических параметров процесса РР–ДУФ подтверждена экспериментальным исследованием по формообразованию конструктивно-подобных образцов панелей с рёбрами прямоугольного и Г-образного сечений. Установлено, что форма сечения ребра не оказывает существенного влияния на результаты расчётов.

8. Установка для формообразования и правки раскаткой роликами УФП-1 с ЧПУ защищена патентом РФ на полезную модель.

9. Разработаны и внедрены в производство нормативно-техническая и рабочая технологическая документация по формообразованию продольно-оребрённых панелей комбинированным методом “раскатка роликами – дробеударное формообразование” на оборудовании с ЧПУ (см. Приложение В).

Перспективы дальнейших исследований:

- расширение номенклатуры материалов обрабатываемых деталей (например, титановые стали и т.д.);

- разработка программного обеспечения для определения режимов ДУФ с использованием алгоритмов машинного обучения с целью повышения точности расчётов и экономии вычислительных ресурсов;

- разработка цифровой модели технологического сочетания “раскатка роликами – дробеударная обработка – зачистка – дробеударное” упрочнение при изготовлении панелей с продольным оребрением с оптимизацией на этой основе режимов и условий обработки по критериям точности формы и ресурсных характеристик.

Таким образом, диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, в котором теоретические разработки доведены до практической реализации в виде конкретных методик, программных и технических средств, внедренных в производство, что подтверждает ее научную и практическую ценность.

Список сокращений и условных обозначений

- ДУФ – дробеударное формообразование
- КПО – конструктивно подобный образец
- КЭМ – конечно-элементная модель
- НДС – напряженно-деформированное состояние
- НН – начальные напряжения
- ОН – остаточные напряжения
- РР – раскатка рёбер
- РУ – расчётный участок
- УДИОН – установка для измерения остаточных напряжений
- УДФ – установка дробеударного формообразования
- УФП – установка формообразования и правки
- ЧПУ – числовое программное управление
- ШКС – шаблон контура сечения
- ЭМД – электронная модель детали
- CAD – *Computer-aided design* – система автоматизированного проектирования
- CAE – *Computer-aided engineering* – система автоматизированного инженерного анализа

Список литературы

1. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 томах. / В.И. Анурьев; под ред. И.Н. Жестковой. – 8-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 2001. – Т.1. – 920 с.
2. Баскаков, С.Т. Определение характера формообразования тонколистовых заготовок при малых прогибах после дробеструйной обработки / С.Т. Баскаков, В.Н. Баушев, Д.А. Федоров // Авиационная промышленность. – 1980. – №13. – С. 13–15.
3. Баскаков, С.Т. Формообразование длинномерных панелей / С.Т. Баскаков, Ю.С. Пилякин // Авиационная промышленность. – 1987. – №10. – С. 3–4.
4. Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести: учебник / Н.И. Безухов. – Москва: Высшая школа, 1968. – 512 с.
5. 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.
6. Белянин, П.Н. Производство широкофюзеляжных самолётов / П.Н. Белянин. – Москва: Машиностроение, 1979. – 360 с.
7. Белянин, П.Н. Технология и оборудование для производства широкофюзеляжных самолётов в США / П.Н. Белянин. – Москва: Машиностроение, 1979. – 256 с.
8. Брондз, Л.Д. Технология и обеспечение ресурса самолётов: производственное издание / Л.Д. Брондз. – Москва: Машиностроение, 1986. – 182 с.
9. Веричев, С.Н. К анализу формообразования орebrённых панелей при медленных режимах / С.Н. Веричев, Г.А. Раевская, Б.В. Горев // Авиационная промышленность. №2, 1990. – С. 8-11.

10. Викулова, С.В. Повышение эффективности формообразования – упрочнения оребрѐнных панелей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Викулова Светлана Владимировна. – Иркутск, 2011. – 20 с.
11. Вишняков, Я.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах: научное издание/ Я.Д. Вишняков, В.Д. Пискарев. – М.: Металлургия, 1989. – 254 с.
12. Власов, В.З. Тонкостенные упругие стержни / В.З. Власов. – М: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 574 с.
13. Выбор режимов дробеструйной обработки, обеспечивающих заданные параметры наклепанного слоя / М.С. Дрозд, А.В. Федоров, С.Л. Лебский и др. // Вестник машиностроения. – 1977. – №3. – С. 42-45.
14. Гдалевич, А.И. Финишная обработка лепестковыми кругами / А.И. Гдалевич. – М.: Машиностроение, 1990. – 111 с.
15. Горбунов, М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов : учебник для втузов по спец. "Самолетостроение" / М.Н. Горбунов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
16. Гречников, Ф. В., Математическая модель анизотропного упругопластического материала / Ф. В. Гречников, Я. А. Ерисов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 6(30). – С. 73-79.
17. Грошиков, А.И. Заготовительно-штамповочные работы в самолетостроении: учебное пособие для авиационных техникумов / А.И. Грошиков, Ю.Л. Заславский, Н. И. Горбенко. – М.: Оборонгиз, 1961. – 555 с.
18. Грошиков, А.И. Заготовительно-штамповочные работы в самолетостроении : учебное издание / А.И. Грошиков, В.А. Малафеев. – М.: Машиностроение, 1976. – 440 с.
19. Давиденков, Н.Н. Исследование остаточных напряжений, создаваемых изгибом / Н.Н. Давиденков, Е.М. Шевандин // Журнал технической физики. – 1939. – Т. IX. – вып. 12. – С. 1112-1124.

20. Давиденков, Н.Н. Опыт измерения остаточных напряжений в трубах / Н.Н. Давиденков, М.В. Якутович // Журнал технической физики. – 1931. – Т. 1. – вып. 2-3.
21. Дарков А.В. Сопротивление материалов: Учебник для вузов / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. – 4-е изд. – М.: Высшая Школа, 1975. – 654 с.
22. Дияк, А.Ю. Система автоматизированной подготовки управляющих программ формообразования листовых деталей на контактных дробемётных установках с ЧПУ : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Дияк Алексей Юрьевич. – Иркутск, 2005. – 19 с.
23. Дрозд, М.С. Аналитическое исследование напряжённого состояния при внедрении упругой сферы в упругопластическое полупространство / М.С. Дрозд, А.П. Осипенко // Металловедение и прочность металлов: сборник научных трудов. – Волгоград: ВПИ, 1977. – С. 58-68.
24. Дрозд, М.С. Исследование влияния начальной напряженности деталей на эпюру остаточных напряжений после ППД / М.С. Дрозд, А.В. Федоров, С.Л. Лебский // Повышение точности и качества обработки деталей машин и приборов : тезисы докладов семинара. – 1977. – С. 23-29.
25. Дудкин, А.И. Поверхностное упрочнение монолитных панелей с одновременным образованием теоретического контура // Авиационная промышленность. – 1976. – №10. – С. 5-8.
26. Житомирский, Г.И. Конструкция самолетов : учебник для студентов авиационных специальностей вузов / Г.И. Житомирский. – М.: Машиностроение, 1991. – 400 с.
27. Журавлёв, Д.А. Статистическая модель учёта отклонений формы панели при зачистке и упрочнении / Д.А. Журавлёв, В.Н. Москвитин // Повышение эффективности технологических процессов механообработки: сборник научных трудов. – Иркутск: ИПИ, 1990. – С. 100-106.
28. Журавлев, Д.А. Алгоритмизация процессов дробеструйной формовки и упрочнения сложных деталей на установках с ЧПУ / Д.А. Журавлев, О.Д. Марченко

// Машинное проектирование, увязка и воспроизведение сложных деталей в авиатехнике : сборник научных трудов. – Иркутск: ИПИ, 1977. – С. 62-71.

29. Журавлев, Д.А. Динамическая контактная задача при дробеструйной обработке / Д.А. Журавлев, О.Д. Марченко // Машинное проектирование, увязка и воспроизведение сложных деталей в авиатехнике: сборник научных трудов. – Иркутск: ИПИ, 1978. – С.105-129.

30. Журавлёв, Д.А. Исследование процесса дробеударного формообразования длинномерных панелей летательных аппаратов / Д.А. Журавлёв // Вестник ИрГТУ. – 1998.– №3. – С. 23-26.

31. Замашиков, Ю.И. Экспресс-метод определения остаточных напряжений в закаленных плитах / Ю.И. Замашиков, С.К. Каргапольцев // Повышение эффективности технологических процессов механообработки. – Иркутск: ИПИ, 1990. – С. 90-96.

32. Захаров, В.А. Формообразование и правка длинномерных профильных деталей поверхностным пластическим деформированием: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Захаров Владимир Алексеевич. – Иркутск, 1992. – 21 с.

33. Илюшкин, М.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе ANSYS/LS-DYNA (осадка цилиндрической заготовки) : учебно-методическое пособие / М.В. Илюшкин. – Ульяновск: УлГУ, 2013. – 112 с.

34. 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.

35. Каргапольцев, С.К. Метод оценки остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов / С. К. Каргапольцев, В. Е. Гозбенко, Р. С. Большаков // Современные авиационные технологии. International Conference on Aviation Engineering : Материалы XVI международной научно-практической конференции, Иркутск, 03–07 июля 2023 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. – С. 86-91.

36. Каргапольцев, С.К. Термические остаточные напряжения в заготовках призматической формы / С.К. Каргапольцев, С.И. Ботвенко // Технологическое и

инструментальное обеспечение механообработки : сборник научных трудов. – Иркутск: ИПИ, 1993. – С. 9-12.

37. Китов, А.К. Повышение качества поверхности при обработке эластичным абразивным инструментом / А.К. Китов, Л.А. Карманов, В.И. Суздальницкий // Управление технологическими процессами в машиностроении: сборник научных трудов – Иркутск: ИПИ, 1989. – С. 43-48.

38. Кононенко, В.Г. Расчет основных технологических параметров гибки монолитных панелей методами локального деформирования рёбер / В.Г. Кононенко, В.Т. Сикульский // Обработка металлов давлением в машиностроении. – 1980. – Вып. 16. – С. 6-10.

39. Кононенко, В.Г. Исследование возможностей формоизменения монолитных панелей путём последовательного деформирования рёбер / В.Г. Кононенко, В.Т. Сикульский // Проблемы машиностроения : республиканский межведомственный сборник. – 1981. – Вып. 14. – С. 32-36.

40. Кооп, Р. Пластическое формообразование при помощи дробеструйной обработки – гибкий процесс обработки давлением / Р. Кооп // Сборник трудов первой международной конференции по обработке дробью. – Париж, 1981. – С. 541-554.

41. Кочетов, Н.Н. Технологические основы снижения коробления и повышения качества производства крупногабаритных деталей пониженной жёсткости / Н.Н. Кочетов и др. // Технология авиационного производства. сборник научных трудов. – М.: НИАТ, 1978. – С. 64-67.

42. Крысин, В.Н. Технологическая подготовка авиационного производства / В.Н. Крысин. – М.: Машиностроение, 1984. – 200 с.

43. Кучеряев, Б.В. Моделирование процессов и объектов в металлургии: учебное пособие для студентов вузов / Б.В. Кучеряев. – М.: Учеба, 2004. – 62 с.

44. 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.

45. Макаров, В.И. Формообразование обводообразующих элементов летательных аппаратов методом дробеударной обработки и компенсирующей гибки-прокатки: автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.07.04 / Макаров Владимир Иванович. – М., 1990. – 21 с.

46. Макарук, А.А. Технология формообразования и правки малоожестких деталей раскаткой роликами / А.А. Макарук, Н.В. Минаев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 6-2. – С. 404-408.

47. Макарук, А.А. Повышение эффективности формообразования и правки малоожестких деталей раскаткой роликами : автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Макарук Александр Александрович. – Иркутск, 2012. – 19 с.

48. Макарук, А.А. Повышение эффективности формообразования и правки малоожестких подкрепленных ребрами деталей раскаткой роликами / А.А. Макарук, Н.В. Минаев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 12(107). – С. 63-70.

49. Макарук, А.А., Повышение эффективности формообразования и правки малоожестких подкрепленных ребрами деталей раскаткой роликами / А.А. Макарук // Вестник ИрГТУ. – 2015. – №12(107). – С. 63-69.

50. Маталин, А.А. Коробление тонкостенных деталей в процессе их механической обработки / А.А. Маталин, И.П. Моисеев // Технология и автоматизация машиностроения. – Киев: Техника, 1968. – Вып. 4. – С. 47-53.

51. Мозалевская, А.К. Исследование остаточных напряжений. Численное моделирование / А.К. Мозалевская, Р.С. Большаков, С.К. Каргапольцев // Системы. Методы. Технологии. – 2025. – № 2(66). – С. 16–21.

52. Мошнин, Е.И. Гибка, обтяжка и правка на прессах : технология и оборудования / Е.И. Мошнин. – М.: Машгиз, 1959. – 359 с.

53. 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.

54. Овсеенко, А.Н. Технологические остаточные напряжения и методы их

определения / А.Н. Овсеенко // Прогрессивные технологические процессы механо-сборочного производства в турбостроении: сборник научных трудов ЦНИИТ-МАШ. – М., 1986. – Вып. 196. – С. 9-15.

55. Официальный сайт Eckold. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eckold.com>, свободный (дата обращения 01.09.2025).

56. Официальный сайт Kugelstrahlzentrum Aachen. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ksa.de.com>, свободный (дата обращения 01.09.2025).

57. Официальный сайт Livermore Software Technology Corporation. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lstc.com/products/lstc-dyna>, свободный (дата обращения 01.09.2025).

58. Официальный сайт Wheelabrator group. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wheelabratorgroup.com/ru-ru/>, свободный (дата обращения 01.09.2025).

59. Пат. № 2566689 С2 РФ, МПК В21D 1/02. Способ правки длинномерной подкреплённой рёбрами детали и устройство для его осуществления (варианты) / А.Е. Пашков, А.В. Крючкин, А.А. Макарук; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ИРНИТУ» и ОАО «Корпорация «Иркут». – № 2013156560/02 ; заявл. 20.12.2013 ; опубл. 27.10.2015.

60. Пат. № 4498325A US, Method for shaping panels by a bending operation, in particular panels for aircraft fuselage skin, and apparatus for implementing such method / H. Reccius, W. Ponitzsch, G. Eckold, H. Maass; заявитель и патентообладатель Walter Eckold GmbH & Co KG, Andreasberg; Dornier GmbH, Friedrichshafen, both of Fed. Rep. of Germany. – №426472 ; заявл. 29.09.1982 ; опубл. 12.02.1985.

61. Пат. № 4955222A US, Deforming panels having ribs / H. Reccius; заявитель и патентообладатель Fairchild Dornier GmbH, Deutsche Aircraft GmbH. – №324548 ; заявл. 16.03.1989 ; опубл. 11.09.1990.

62. Пат. №2121666 РФ, МКИ: 3G 01L 1/06 А. Способ определения остаточных напряжений / Ю.И. Замашников; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный технический университет. – №96107536/28; заявл. 18.04.96 ; опубл. 10.11.98.2010.

63. Пат. №4461124A US Automatic or manual four-axes sanding machine system for sanding and/or finishing a vertically held contoured / D.A. Anderson; заявитель и патентообладатель Boeing Co. – №352729 ; заявл. 26.02.1982 ; опубл. 24.07.1984.

64. Пат. №7181944 B2 US Method and device for shape structural parts by shot blasting or peening / F. Wuestefeld, W. Linnemann, S. Kittel; заявитель и патентообладатель Kugelstrahlzentrum Aachen GmbH. – №10/333943 ; заявл. 17.07.2001 ; опубл. 27.02.2007.

65. Пат. US 6938448 B2 Shaped metal panels and forming same by shot peening / S. Kennerknecht, D. Cook; заявитель и патентообладатель Sonaca NMF Canada Inc, NMF Canada Inc. – №09/946574 ; заявл. 5.09.2001 ; опубл. 6.09.2005.

66. Пашков, А.Е. Автоматизированная технология комбинированного формообразования панелей самолетов / А.Е. Пашков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, №6(2). – С. 453-457.

67. 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.

68. Пашков, А.Е. Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей : научное издание / А.Е. Пашков. – Иркутск: ИрГТУ, 2005. – 140 с.

69. Пашков, А.Е. Технологический комплекс для формообразования длинномерных панелей и обшивок на базе отечественного оборудования / А.Е. Пашков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, №1(5). – С. 1528-1535.

70. Полухин, В.П. Электронная модель для исследования установившихся процессов непрерывной прокатки / В.П. Полухин, В.В. Лурье, А.П. Алешин // Труды московского института стали и сплавов: научные труды. – М.: Металлургия. – 1970. – вып. 64. – С. 15-19.

71. Прочность устойчивых колебаний : Справочник в 3-х томах / под ред. д-

ра. техн. наук, профессора И.А. Биргира. – М., Машиностроение, 1968. – Т. 1. – 832 с.

72. Разработка технологического процесса упрочнения длинномерной детали на оборудовании с программным управлением / В.А. Смирнов, М.И. Лысов, Ю.С. Румянцев и др. // Механизация и автоматизация процессов формообразования и упрочнения тонкостенных деталей: сборник научных трудов. – Казань : 1984. – С. 92.

73. Румянцев, Ю.С. Об устранении поволоков крупногабаритных поверхностно упрочненных деталей из алюминиевых сплавов / Ю.С. Румянцев, Н.В. Анисимова, А.Г. Рудаков // Авиационная промышленность. –1992. –№ 12. – С. 5-6.

74. Рыбин, Ю.И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением : учебное пособие / Ю.И. Рыбин, А.И. Рудской, А.М. Золотов. – СПб.: Наука, 2004. – 644 с.

75. Рыковский, Б.П. Местное упрочнение деталей поверхностным наклёпом / Б.П. Рыковский, В.А. Смирнов, Г.М. Щетинин. – М.: Машиностроение, 1985. – 152 с.

76. Саверин, М.М. Дробеструйный наклёп : теоретические основы и практика применения / М.М. Саверин. – М.: Машгиз, 1955. – 312 с.

77. Садков, В.В. Формообразование первых комплектов КЧК самолёта Ту-204 / В.В. Садков, В.И. Макаров, Н.М. Бирюков // Авиационная промышленность. – 1989. – №4. – С. 14-15.

78. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013612465. Автоматизированная система определения остаточных напряжений в образцах на установке для измерения остаточных напряжений 2013 / П.С. Смольков, Ю.И. Замащиков, П.В. Мельников и др. – Заявка 2012619665. Дата поступления 08.11.2012 г. Зарегистрированное в Реестре программ для ЭВМ 28.02.2013 г.

79. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022617997 Расчет технологических параметров формообразования и правки ребристых панелей раскаткой роликами 2022 / А.А. Макарук, Н.В. Минаев, А.Е.

Пашков и др. – Заявка 2022617414. Дата поступления 25.04.2022 г. Зарегистрированное в Реестре программ для ЭВМ 27.04.2022 г.

80. Сикульский, В.Т. Разработка устройств для формообразования и доводки монолитных панелей сложной формы / В.Т. Сикульский // Вісник «ХІІІ». – 2014. – №24 (1133). – С. 108–120.

81. Сикульский, В.Т. Формоизменение монолитных панелей локальным деформированием рёбер / В.Т. Сикульский // Обработка металлов давлением в машиностроении. – 1982. – вып. 18. – С. 16-17.

82. Сикульский, В.Т. Формообразование монолитных панелей сложной формы / В.Т. Сикульский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – №5 (102). – С. 12 – 16.

83. Скосоренко, К.Н. Формообразование длинномерных панелей двойной кривизны методом раскатки рёбер жесткости и дробеударной обработки в авиастроении: автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.07.04 / Скосоренко Карен Николаевич. – М.: МАИ, 1990. – 16 с.

84. Смирнов, В.А. Определение параметров процесса дробеударного формообразования / В.А. Смирнов, М.И. Лысов // Труды Казанского авиационного института. – 1973. – Вып. 159. – С. 17-19.

85. Смирнов, В.А. Программирование управляемой дробемётной обработки и разработка базовой технологии упрочнения крупногабаритных деталей / В.А. Смирнов, Ю.С. Румянцев // Технология авиационного производства: сборник научных трудов. – М.: НИАТ, 1987. – С. 79-81.

86. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением : учебное пособие для студентов вузов / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.

87. Тимошенко, С.П. Курс теории упругости / С.П. Тимошенко. – Киев: Наукова думка, 1972. – 508 с.

88. Томлёнов, А.Д. Механика процессов обработки металлов давлением / А.Д. Томлёнов. – М.: Машгиз, 1963. – 263 с.

89. Томсен, Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов

/ Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши; перевод с английского под редакцией д.т.н. проф. Е.П. Унксова. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.

90. Формообразование монолитных панелей с местным перегибом / В.С. Шелков, Л.А. Самохвалова, С.А. Утешев и др. // *Авиационная промышленность*. – 1982. – Приложение №1. – С. 24-27.

91. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл; пер. с англ. Э. И. Григолюка. – М.: Гостехиздат, 1956. – 409 с.

92. Чапышев, А.П. Повышение эффективности технологического сочетания "дробеударное формообразование -зачистка при изготовлении крупногабаритных листовых деталей" : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Чапышев Александр Петрович. – Иркутск, 2004. – 16 с.

93. Шевнюк, Ю.В. Дробеударное формообразование монолитных панелей из прессованных заготовок / Ю.В. Шевнюк // *Авиационная промышленность*. – 1966. – №2. – С. 21-24.

94. Шелков, В.С. Формообразование монолитных панелей двойной кривизны с рёбрами жесткости, расположенными с выпуклой стороны обшивки / В.С. Шелков, В.Н. Баушев // *Авиационная промышленность*. – 1985. – №9. – С. 19–22.

95. A theoretical model for load prediction in rolling correction process of thin-walled aeronautic parts / L.X. Lu, J. Sun, Y. L. Li, J.F. Li // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – P. 4121-4131.

96. Barlat, F. A six-component yield function for anisotropic materials / F. Barlat, D.J. Lege, J.C. Brem // *International Journal Plasticity*. – 1991. – Vol. 7, Is. 7 P. 693-712.

97. Vaughman, D.L. An overview of peen forming technology / D.L. Vaughman // *2-th Int. Conf. on Shot Peening*. – Chicago, IL, USA. – 14-17 May, 1984 – P. 28-33.

98. Raabe, D. Continuum Scale Simulation of Engineering Materials / D. Raabe, F. Roters, F. Barlat, L. Chen // *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*. – April 5. 2004. – 866 p.

99. Doelfs, P. Using MSC. Nastran for Explicit FEM Simulations / P. Doelfs // *LS-Dyna Anwenderforum*. – Bamberg. 2004. – E-III. – P. 1-6.

100. Carolyn, K. Shaping Parts with Shot Peen Forming / K. Carolyn // *The*

Shot Peener. – 2014. – Vol. 28, Is. 3. – P. 6-8.

101. Hill, R. A theory of the yield and plastic flow of anisotropic metals / R. Hill // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. – 1948. – Vol. 193, Is. 1033. – P. 281-297.

102. Hosford, W.F. A generalised isotropic yield criterion / W.F. Hosford // Journal of applied Mechanics. – 1972. – Vol. 39(2). – P. 607-609.

103. Hallquist, J. O. Ls-dyna theory manual / J. O. Hallquist. – Livermore Software Technology Corporation, march 2006. – 680 p.

104. Lu, L. X. Investigation on distortion mechanism and correcting load calculation method for aluminum beam structure by bilateral rolling process / L. X. Lu, J. Sun // 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS 2016). – 2016. – P. 781-786.

105. 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. – Vol. 133. – P. 585-591.

106. Pashkov, A.E. Parameters identification for combined forming of complex shaped sheet metal components / A.E. Pashkov, A.Y. Malashchenko, A.A. Pashkov, T.V. Zarak // Advances in Engineering Research: International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). – 2018. – Vol. 158. – P. 323-329.

107. 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 (ICSP-7). – P. 1-17.

108. Roters, F. Crystal Plasticity Finite Element Methods / F. Roters, P. Eisenlohr, T.R. Bieler, D. Raabe. – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. – 207 p.

109. Sikulskiy, V. Study of the process of shape-formation of ribbed double-curvature panels by local deforming / V. Sikulskiy, V. Kashcheyeva, Yu. Romanenkov, A. Shapoval // Engineering technological systems, Easren-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – № 4/1 (88). – P. 43-49.

110. Vaccari, J.A. Peen forming enters computer age / J.A. Vaccari // American Machinist. – 1985. – P. 91-94.

Приложение А

(справочное)

Таблица А.1 – Стрелы прогибов однорёберного образца по результатам моделирования

| Растягивающее усилие, Н | Стрела прогиба, мм |
|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|
| 200 | 0,0112 | 1800 | 0,1974 | 3 750 | 0,4112 | 8 800 | 0,965 | 15 000 | 1,645 |
| 250 | 0,0274 | 2 000 | 0,2193 | 4 000 | 0,4386 | 9 000 | 0,987 | 15 600 | 1,711 |
| 333 | 0,0365 | 2 200 | 0,2413 | 4 333 | 0,4752 | 9 900 | 1,086 | 16 500 | 1,809 |
| 500 | 0,0548 | 2 250 | 0,2467 | 4 500 | 0,4935 | 10 000 | 1,097 | 18 000 | 1,974 |
| 600 | 0,0658 | 2 333 | 0,2558 | 5 000 | 0,5483 | 10 400 | 1,14 | 19 500 | 2,138 |
| 750 | 0,0823 | 2 400 | 0,2632 | 5 500 | 0,6031 | 10 500 | 1,151 | 21 000 | 2,303 |
| 800 | 0,0877 | 2 500 | 0,2742 | 5 600 | 0,6141 | 10 800 | 1,184 | 22 000 | 2,413 |
| 900 | 0,0987 | 2 600 | 0,2851 | 6 000 | 0,658 | 11 000 | 1,206 | 22 500 | 2,467 |
| 1 000 | 0,1097 | 2 700 | 0,2961 | 6 300 | 0,6909 | 11 700 | 1,283 | 26 000 | 2,851 |
| 1 100 | 0,1206 | 2 750 | 0,3016 | 6 500 | 0,7128 | 12 000 | 1,316 | 27 000 | 2,961 |
| 1 200 | 0,1316 | 3 000 | 0,329 | 7 000 | 0,7676 | 12 100 | 1,327 | 30 000 | 3,29 |
| 1 250 | 0,1371 | 3 250 | 0,3564 | 7 200 | 0,7896 | 13 000 | 1,426 | 33 000 | 3,619 |
| 1 400 | 0,1535 | 3 300 | 0,3619 | 7 500 | 0,8225 | 13 200 | 1,448 | 39 000 | 4,277 |
| 1500 | 0,1645 | 3 500 | 0,3838 | 7 700 | 0,8444 | 13 500 | 1,48 | 45 000 | 4,935 |
| 1667 | 0,1828 | 3 600 | 0,3948 | 8 100 | 0,8883 | 14 000 | 1,535 | | |
| 1750 | 0,1919 | 3 667 | 0,4021 | 8 400 | 0,9212 | 14 300 | 1,568 | | |

Таблица А.2 – Результаты моделирования двухрёберного образца

| Номер моделирования | Растягивающее усилие | | | Стрела прогиба | | |
|---------------------|----------------------|-------|--------|----------------|--------|--------|
| | F1, Н | F2, Н | F2/F1 | f1, мм | f2, мм | f1/f2 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 1 000 | 200 | 0,2000 | 0,1061 | 0,0137 | 0,9672 |
| 13 | 3 000 | 600 | 0,2000 | 0,3184 | 0,0803 | 0,9678 |
| 25 | 5 000 | 1 000 | 0,2000 | 0,5307 | 0,1338 | 0,9679 |
| 37 | 7 000 | 1 400 | 0,2000 | 0,7429 | 0,1873 | 0,9678 |
| 49 | 9 000 | 1 800 | 0,2000 | 0,9552 | 0,2409 | 0,9678 |
| 61 | 11 000 | 2 200 | 0,2000 | 1,1670 | 0,2944 | 0,9677 |
| 73 | 13 000 | 2 600 | 0,2000 | 1,3800 | 0,3479 | 0,9677 |
| 85 | 15 000 | 3 000 | 0,2000 | 1,5920 | 0,4015 | 0,9678 |

Продолжение таблицы А.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2 | 1 000 | 250 | 0,2500 | 0,1064 | 0,0320 | 0,9699 |
| 14 | 3 000 | 750 | 0,2500 | 0,3193 | 0,0960 | 0,9705 |
| 26 | 5 000 | 1 250 | 0,2500 | 0,5310 | 0,1601 | 0,9684 |
| 38 | 7 000 | 1 750 | 0,2500 | 0,7450 | 0,2241 | 0,9706 |
| 50 | 9 000 | 2 250 | 0,2500 | 0,9578 | 0,2881 | 0,9704 |
| 62 | 11 000 | 2 750 | 0,2500 | 1,1710 | 0,3521 | 0,9710 |
| 74 | 13 000 | 3 250 | 0,2500 | 1,3830 | 0,4162 | 0,9698 |
| 86 | 15 000 | 3 750 | 0,2500 | 1,5960 | 0,4802 | 0,9702 |
| 3 | 1 000 | 333 | 0,3333 | 0,1069 | 0,0407 | 0,9745 |
| 15 | 3 000 | 1 000 | 0,3333 | 0,3207 | 0,1223 | 0,9748 |
| 27 | 5 000 | 1 667 | 0,3333 | 0,5345 | 0,2038 | 0,9748 |
| 39 | 7 000 | 2 333 | 0,3333 | 0,7483 | 0,2853 | 0,9749 |
| 51 | 9 000 | 3 000 | 0,3333 | 0,9621 | 0,3669 | 0,9748 |
| 63 | 11 000 | 3 667 | 0,3333 | 1,1760 | 0,4484 | 0,9751 |
| 75 | 13 000 | 4 333 | 0,3333 | 1,3900 | 0,5299 | 0,9748 |
| 87 | 15 000 | 5 000 | 0,3333 | 1,6040 | 0,6114 | 0,9751 |
| 12 | 3 000 | 1 000 | 0,3333 | 0,3207 | 0,1223 | 0,9748 |
| 24 | 9 000 | 3 000 | 0,3333 | 0,9621 | 0,3669 | 0,9748 |
| 36 | 15 000 | 5 000 | 0,3333 | 1,6040 | 0,6114 | 0,9751 |
| 48 | 21 000 | 7 000 | 0,3333 | 2,2450 | 0,8560 | 0,9748 |
| 60 | 27 000 | 9 000 | 0,3333 | 2,8860 | 1,1010 | 0,9747 |
| 72 | 33 000 | 11 000 | 0,3333 | 3,5280 | 1,3450 | 0,9749 |
| 84 | 39 000 | 13 000 | 0,3333 | 4,1690 | 1,5900 | 0,9747 |
| 96 | 45 000 | 15 000 | 0,3333 | 4,8110 | 1,8340 | 0,9749 |
| 4 | 1 000 | 500 | 0,5000 | 0,1079 | 0,0583 | 0,9836 |
| 16 | 3 000 | 1 500 | 0,5000 | 0,3236 | 0,1748 | 0,9836 |
| 28 | 5 000 | 2 500 | 0,5000 | 0,5393 | 0,2913 | 0,9836 |
| 40 | 7 000 | 3 500 | 0,5000 | 0,7550 | 0,4078 | 0,9836 |
| 52 | 9 000 | 4 500 | 0,5000 | 0,9708 | 0,5243 | 0,9836 |
| 64 | 11 000 | 5 500 | 0,5000 | 1,1870 | 0,6408 | 0,9842 |
| 76 | 13 000 | 6 500 | 0,5000 | 1,4020 | 0,7574 | 0,9832 |
| 88 | 15 000 | 7 500 | 0,5000 | 1,6180 | 0,8739 | 0,9836 |
| 11 | 2 000 | 1 000 | 0,5000 | 0,2157 | 0,1165 | 0,9836 |
| 23 | 6 000 | 3 000 | 0,5000 | 0,6472 | 0,3495 | 0,9836 |
| 35 | 10 000 | 5 000 | 0,5000 | 1,0790 | 0,5826 | 0,9836 |
| 47 | 14 000 | 7 000 | 0,5000 | 1,5100 | 0,8156 | 0,9837 |
| 59 | 18 000 | 9 000 | 0,5000 | 1,9420 | 1,0490 | 0,9838 |
| 71 | 22 000 | 11 000 | 0,5000 | 2,3730 | 1,2820 | 0,9834 |
| 83 | 26 000 | 13 000 | 0,5000 | 2,8040 | 1,5150 | 0,9835 |
| 95 | 30 000 | 15 000 | 0,5000 | 3,2360 | 1,7480 | 0,9836 |
| 10 | 1 500 | 1 000 | 0,6667 | 0,1632 | 0,1136 | 0,9921 |
| 22 | 4 500 | 3 000 | 0,6667 | 0,4897 | 0,3409 | 0,9923 |
| 34 | 7 500 | 5 000 | 0,6667 | 0,8162 | 0,5682 | 0,9923 |
| 46 | 10 500 | 7 000 | 0,6667 | 1,1430 | 0,7954 | 0,9930 |
| 58 | 13 500 | 9 000 | 0,6667 | 1,4690 | 1,0230 | 0,9926 |

Продолжение таблицы А.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 70 | 16 500 | 11 000 | 0,6667 | 1,7960 | 1,2500 | 0,9928 |
| 82 | 19 500 | 13 000 | 0,6667 | 2,1220 | 1,4770 | 0,9925 |
| 94 | 22 500 | 15 000 | 0,6667 | 2,4490 | 1,7040 | 0,9927 |
| 5 | 1 000 | 800 | 0,8000 | 0,1096 | 0,0898 | 0,9991 |
| 17 | 3 000 | 2 400 | 0,8000 | 0,3288 | 0,2693 | 0,9994 |
| 29 | 5 000 | 4 000 | 0,8000 | 0,5480 | 0,4488 | 0,9995 |
| 41 | 7 000 | 5 600 | 0,8000 | 0,7672 | 0,6283 | 0,9995 |
| 53 | 9 000 | 7 200 | 0,8000 | 0,9863 | 0,8078 | 0,9993 |
| 65 | 11 000 | 8 800 | 0,8000 | 1,2060 | 0,9873 | 1,0000 |
| 77 | 13 000 | 10 400 | 0,8000 | 1,4250 | 1,1670 | 0,9993 |
| 89 | 15 000 | 12 000 | 0,8000 | 1,6440 | 1,3460 | 0,9994 |
| 9 | 1 200 | 1 000 | 0,8333 | 0,1317 | 0,1119 | 1,0008 |
| 21 | 3 600 | 3 000 | 0,8333 | 0,3952 | 0,3357 | 1,0010 |
| 33 | 6 000 | 5 000 | 0,8333 | 0,6587 | 0,5595 | 1,0011 |
| 45 | 8 400 | 7 000 | 0,8333 | 0,9222 | 0,7833 | 1,0011 |
| 57 | 10 800 | 9 000 | 0,8333 | 1,1860 | 1,0070 | 1,0017 |
| 69 | 13 200 | 11 000 | 0,8333 | 1,4490 | 1,2310 | 1,0007 |
| 81 | 15 600 | 13 000 | 0,8333 | 1,7130 | 1,4550 | 1,0012 |
| 93 | 18 000 | 15 000 | 0,8333 | 1,9760 | 1,6790 | 1,0010 |
| 6 | 1 000 | 900 | 0,9000 | 0,1102 | 0,1002 | 1,0046 |
| 18 | 3 000 | 2 700 | 0,9000 | 0,3305 | 0,3007 | 1,0046 |
| 30 | 5 000 | 4 500 | 0,9000 | 0,5509 | 0,5012 | 1,0047 |
| 42 | 7 000 | 6 300 | 0,9000 | 0,7712 | 0,7017 | 1,0047 |
| 54 | 9 000 | 8 100 | 0,9000 | 0,9915 | 0,9022 | 1,0046 |
| 66 | 11 000 | 9 900 | 0,9000 | 1,2120 | 1,1030 | 1,0050 |
| 78 | 13 000 | 11 700 | 0,9000 | 1,4320 | 1,3030 | 1,0042 |
| 90 | 15 000 | 13 500 | 0,9000 | 1,6530 | 1,5040 | 1,0049 |
| 20 | 3 300 | 3 000 | 0,9100 | 0,3637 | 0,3340 | 1,0050 |
| 44 | 7 700 | 7 000 | 0,9100 | 0,8487 | 0,7793 | 1,0051 |
| 68 | 12 100 | 11 000 | 0,9100 | 1,3340 | 1,2250 | 1,0053 |
| 80 | 14 300 | 13 000 | 0,9100 | 1,5760 | 1,4470 | 1,0051 |
| 8 | 1 100 | 1 000 | 0,9100 | 0,1212 | 0,1113 | 1,0050 |
| 32 | 5 500 | 5 000 | 0,9100 | 0,6062 | 0,5566 | 1,0051 |
| 56 | 9 900 | 9 000 | 0,9100 | 1,0910 | 1,0020 | 1,0046 |
| 92 | 16 500 | 15 000 | 0,9100 | 1,8190 | 1,6700 | 1,0055 |
| 7 | 1 000 | 1 000 | 1,0000 | 0,1107 | 0,1107 | 1,0091 |
| 19 | 3 000 | 3 000 | 1,0000 | 0,3322 | 0,3322 | 1,0097 |
| 31 | 5 000 | 5 000 | 1,0000 | 0,5537 | 0,5537 | 1,0098 |
| 43 | 7 000 | 7 000 | 1,0000 | 0,7752 | 0,7752 | 1,0099 |
| 55 | 9 000 | 9 000 | 1,0000 | 0,9967 | 0,9967 | 1,0098 |
| 67 | 11 000 | 11 000 | 1,0000 | 1,2180 | 1,2180 | 1,0100 |
| 79 | 13 000 | 13 000 | 1,0000 | 1,4400 | 1,4400 | 1,0098 |
| 91 | 15 000 | 15 000 | 1,0000 | 1,6610 | 1,6610 | 1,0097 |

Продолжение таблицы А.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 8 | 1 000 | 1 100 | 1,1000 | 0,1113 | 0,1212 | 1,0146 |
| 20 | 3 000 | 3 300 | 1,1000 | 0,3340 | 0,3637 | 1,0152 |
| 32 | 5 000 | 5 500 | 1,1000 | 0,5566 | 0,6062 | 1,0151 |
| 44 | 7 000 | 7 700 | 1,1000 | 0,7793 | 0,8487 | 1,0152 |
| 56 | 9 000 | 9 900 | 1,1000 | 1,0020 | 1,0910 | 1,0152 |
| 68 | 11 000 | 12 100 | 1,1000 | 1,2250 | 1,3340 | 1,0158 |
| 80 | 13 000 | 14 300 | 1,1000 | 1,4470 | 1,5760 | 1,0147 |
| 92 | 15 000 | 16 500 | 1,1000 | 1,6700 | 1,8190 | 1,0152 |
| 6 | 900 | 1 000 | 1,1111 | 0,1002 | 0,1102 | 1,0152 |
| 18 | 2 700 | 3 000 | 1,1111 | 0,3007 | 0,3305 | 1,0155 |
| 30 | 4 500 | 5 000 | 1,1111 | 0,5012 | 0,5509 | 1,0156 |
| 42 | 6 300 | 7 000 | 1,1111 | 0,7017 | 0,7712 | 1,0156 |
| 54 | 8 100 | 9 000 | 1,1111 | 0,9022 | 0,9915 | 1,0156 |
| 66 | 9 900 | 11 000 | 1,1111 | 1,1030 | 1,2120 | 1,0157 |
| 78 | 11 700 | 13 000 | 1,1111 | 1,3030 | 1,4320 | 1,0156 |
| 90 | 13 500 | 15 000 | 1,1111 | 1,5040 | 1,6530 | 1,0162 |
| 9 | 1 000 | 1 200 | 1,2000 | 0,1119 | 0,1317 | 1,0201 |
| 21 | 3 000 | 3 600 | 1,2000 | 0,3357 | 0,3952 | 1,0204 |
| 33 | 5 000 | 6 000 | 1,2000 | 0,5595 | 0,6587 | 1,0204 |
| 45 | 7 000 | 8 400 | 1,2000 | 0,7833 | 0,9222 | 1,0205 |
| 57 | 9 000 | 10 800 | 1,2000 | 1,0070 | 1,1860 | 1,0203 |
| 69 | 11 000 | 13 200 | 1,2000 | 1,2310 | 1,4490 | 1,0207 |
| 81 | 13 000 | 15 600 | 1,2000 | 1,4550 | 1,7130 | 1,0203 |
| 93 | 15 000 | 18 000 | 1,2000 | 1,6790 | 1,9760 | 1,0207 |
| 5 | 800 | 1 000 | 1,2500 | 0,0898 | 0,1096 | 1,0230 |
| 17 | 2 400 | 3 000 | 1,2500 | 0,2693 | 0,3288 | 1,0232 |
| 29 | 4 000 | 5 000 | 1,2500 | 0,4488 | 0,5480 | 1,0233 |
| 41 | 5 600 | 7 000 | 1,2500 | 0,6283 | 0,7672 | 1,0231 |
| 53 | 7 200 | 9 000 | 1,2500 | 0,8078 | 0,9863 | 1,0230 |
| 65 | 8 800 | 11 000 | 1,2500 | 0,9873 | 1,2060 | 1,0231 |
| 77 | 10 400 | 13 000 | 1,2500 | 1,1670 | 1,4250 | 1,0237 |
| 89 | 12 000 | 15 000 | 1,2500 | 1,3460 | 1,6440 | 1,0228 |
| 10 | 1 000 | 1 500 | 1,5000 | 0,1136 | 0,1632 | 1,0356 |
| 22 | 3 000 | 4 500 | 1,5000 | 0,3409 | 0,4897 | 1,0362 |
| 34 | 5 000 | 7 500 | 1,5000 | 0,5682 | 0,8162 | 1,0363 |
| 46 | 7 000 | 10 500 | 1,5000 | 0,7954 | 1,1430 | 1,0362 |
| 58 | 9 000 | 13 500 | 1,5000 | 1,0230 | 1,4690 | 1,0365 |
| 70 | 11 000 | 16 500 | 1,5000 | 1,2500 | 1,7960 | 1,0365 |
| 82 | 13 000 | 19 500 | 1,5000 | 1,4770 | 2,1220 | 1,0358 |
| 94 | 15 000 | 22 500 | 1,5000 | 1,7040 | 2,4490 | 1,0359 |
| 11 | 1 000 | 2 000 | 2,0000 | 0,1165 | 0,2157 | 1,0620 |
| 23 | 3 000 | 6 000 | 2,0000 | 0,3495 | 0,6472 | 1,0623 |
| 35 | 5 000 | 10 000 | 2,0000 | 0,5826 | 1,0790 | 1,0626 |
| 47 | 7 000 | 14 000 | 2,0000 | 0,8156 | 1,5100 | 1,0625 |
| 59 | 9 000 | 18 000 | 2,0000 | 1,0490 | 1,9420 | 1,0628 |

Продолжение таблицы А.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 71 | 11 000 | 22 000 | 2,0000 | 1,2820 | 2,3730 | 1,0630 |
| 83 | 13 000 | 26 000 | 2,0000 | 1,5150 | 2,8040 | 1,0624 |
| 95 | 15 000 | 30 000 | 2,0000 | 1,7480 | 3,2360 | 1,0626 |
| 4 | 500 | 1 000 | 2,0000 | 0,0583 | 0,1079 | 1,0626 |
| 16 | 1 500 | 3 000 | 2,0000 | 0,1748 | 0,3236 | 1,0626 |
| 28 | 2 500 | 5 000 | 2,0000 | 0,2913 | 0,5393 | 1,0624 |
| 40 | 3 500 | 7 000 | 2,0000 | 0,4078 | 0,7550 | 1,0625 |
| 52 | 4 500 | 9 000 | 2,0000 | 0,5243 | 0,9708 | 1,0624 |
| 64 | 5 500 | 11 000 | 2,0000 | 0,6408 | 1,1870 | 1,0625 |
| 76 | 6 500 | 13 000 | 2,0000 | 0,7574 | 1,4020 | 1,0626 |
| 88 | 7 500 | 15 000 | 2,0000 | 0,8739 | 1,6180 | 1,0625 |
| 12 | 1 000 | 3 000 | 3,0000 | 0,1223 | 0,3207 | 1,1149 |
| 24 | 3 000 | 9 000 | 3,0000 | 0,3669 | 0,9621 | 1,1152 |
| 36 | 5 000 | 15 000 | 3,0000 | 0,6114 | 1,6040 | 1,1151 |
| 48 | 7 000 | 21 000 | 3,0000 | 0,8560 | 2,2450 | 1,1152 |
| 60 | 9 000 | 27 000 | 3,0000 | 1,1010 | 2,8860 | 1,1155 |
| 72 | 11 000 | 33 000 | 3,0000 | 1,3450 | 3,5280 | 1,1153 |
| 84 | 13 000 | 39 000 | 3,0000 | 1,5900 | 4,1690 | 1,1150 |
| 96 | 15 000 | 45 000 | 3,0000 | 1,8340 | 4,8110 | 1,1149 |
| 3 | 333 | 1 000 | 3,0000 | 0,0407 | 0,1069 | 1,1153 |
| 15 | 1 000 | 3 000 | 3,0000 | 0,1223 | 0,3207 | 1,1149 |
| 51 | 3 000 | 9 000 | 3,0000 | 0,3669 | 0,9621 | 1,1152 |
| 63 | 3 667 | 11 000 | 3,0000 | 0,4484 | 1,1760 | 1,1151 |
| 75 | 4 333 | 13 000 | 3,0000 | 0,5299 | 1,3900 | 1,1151 |
| 87 | 5 000 | 15 000 | 3,0000 | 0,6114 | 1,6040 | 1,1151 |
| 27 | 1 667 | 5 000 | 3,0000 | 0,2038 | 0,5345 | 1,1149 |
| 39 | 2 333 | 7 000 | 3,0000 | 0,2853 | 0,7483 | 1,1153 |
| 2 | 250 | 1 000 | 4,0000 | 0,0320 | 0,1064 | 1,1674 |
| 14 | 750 | 3 000 | 4,0000 | 0,0960 | 0,3193 | 1,1677 |
| 26 | 1 250 | 5 000 | 4,0000 | 0,1601 | 0,5310 | 1,1678 |
| 38 | 1 750 | 7 000 | 4,0000 | 0,2241 | 0,7450 | 1,1678 |
| 50 | 2 250 | 9 000 | 4,0000 | 0,2881 | 0,9578 | 1,1678 |
| 62 | 2 750 | 11 000 | 4,0000 | 0,3521 | 1,1710 | 1,1674 |
| 74 | 3 250 | 13 000 | 4,0000 | 0,4162 | 1,3830 | 1,1678 |
| 86 | 3 750 | 15 000 | 4,0000 | 0,4802 | 1,5960 | 1,1678 |
| 1 | 200 | 1 000 | 5,0000 | 0,0137 | 0,1061 | 1,2203 |
| 13 | 600 | 3 000 | 5,0000 | 0,0803 | 0,3184 | 1,2202 |
| 25 | 1 000 | 5 000 | 5,0000 | 0,1338 | 0,5307 | 1,2197 |
| 37 | 1 400 | 7 000 | 5,0000 | 0,1873 | 0,7429 | 1,2202 |
| 49 | 1 800 | 9 000 | 5,0000 | 0,2409 | 0,9552 | 1,2204 |
| 61 | 2 200 | 11 000 | 5,0000 | 0,2944 | 1,1670 | 1,2201 |
| 73 | 2 600 | 13 000 | 5,0000 | 0,3479 | 1,3800 | 1,2203 |
| 85 | 3 000 | 15 000 | 5,0000 | 0,4015 | 1,5920 | 1,2204 |

Таблица А.3 – Сводная таблица деформации ребер двух рёберного образца по результатам моделирования

| Растягивающее усилие 1-го ребра, Н | Растягивающее усилие 2-го ребра, Н | Соотношение усилий F2/F1; F1/F2 | Стрела прогиба 1-го ребра, мм | Стрела прогиба 2-го ребра, мм | Растягивающее усилие 1-го ребра, Н | Растягивающее усилие 2-го ребра, Н | Соотношение усилий F2/F1; F1/F2 | Стрела прогиба 1-го ребра, мм | Стрела прогиба 2-го ребра, мм |
|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1 000 | 200 | 0,2; 5 | 0,1061 | 0,0268 | 9 000 | 1800 | 0,2; 5 | 0,9552 | 0,2409 |
| 1 000 | 250 | 0,25; 4 | 0,1064 | 0,0320 | 9 000 | 2250 | 0,25; 4 | 0,9578 | 0,2881 |
| 1 000 | 333 | 0,33; 3 | 0,1069 | 0,0407 | 9 000 | 3000 | 0,33; 3 | 0,9621 | 0,3669 |
| 1 000 | 500 | 0,5; 2 | 0,1079 | 0,0583 | 9 000 | 4500 | 0,5; 2 | 0,9708 | 0,5243 |
| 1 000 | 800 | 0,8; 1,25 | 0,1096 | 0,0898 | 9 000 | 7200 | 0,8; 1,25 | 0,9863 | 0,8078 |
| 1 000 | 900 | 0,9; 1,11 | 0,1102 | 0,1002 | 9 000 | 8100 | 0,9; 1,11 | 0,9915 | 0,9022 |
| 1 000 | 1000 | 1; 1 | 0,1107 | 0,1107 | 9 000 | 9000 | 1; 1 | 0,9967 | 0,9967 |
| 1 000 | 1100 | 1,1; 0,91 | 0,1113 | 0,1212 | 9 000 | 9900 | 1,1; 0,91 | 1,0020 | 1,0910 |
| 1 000 | 1200 | 1,2; 0,83 | 0,1119 | 0,1317 | 9 000 | 10800 | 1,2; 0,83 | 1,0070 | 1,1860 |
| 1 000 | 1500 | 1,5; 0,67 | 0,1136 | 0,1632 | 9 000 | 13500 | 1,5; 0,67 | 1,0230 | 1,4690 |
| 1 000 | 2000 | 2; 0,5 | 0,1165 | 0,2157 | 9 000 | 18000 | 2; 0,5 | 1,0490 | 1,9420 |
| 1 000 | 3000 | 3; 0,33 | 0,1223 | 0,3207 | 9 000 | 27000 | 3; 0,33 | 1,1010 | 2,8860 |
| 3 000 | 600 | 0,2; 5 | 0,3184 | 0,0803 | 11 000 | 2200 | 0,2; 5 | 1,1670 | 0,2944 |
| 3 000 | 750 | 0,25; 4 | 0,3193 | 0,0960 | 11 000 | 2750 | 0,25; 4 | 1,1710 | 0,3521 |
| 3 000 | 1000 | 0,33; 3 | 0,3207 | 0,1223 | 11 000 | 3667 | 0,33; 3 | 1,1760 | 0,4484 |
| 3 000 | 1500 | 0,5; 2 | 0,3236 | 0,1748 | 11 000 | 5500 | 0,5; 2 | 1,1870 | 0,6408 |
| 3 000 | 2400 | 0,8; 1,25 | 0,3288 | 0,2693 | 11 000 | 8800 | 0,8; 1,25 | 1,2060 | 0,9873 |
| 3 000 | 2700 | 0,9; 1,11 | 0,3305 | 0,3007 | 11 000 | 9900 | 0,9; 1,11 | 1,2120 | 1,1030 |
| 3 000 | 3000 | 1; 1 | 0,3322 | 0,3322 | 11 000 | 11000 | 1; 1 | 1,2180 | 1,2180 |
| 3 000 | 3300 | 1,1; 0,91 | 0,3340 | 0,3637 | 11 000 | 12100 | 1,1; 0,91 | 1,2250 | 1,3340 |
| 3 000 | 3600 | 1,2; 0,83 | 0,3357 | 0,3952 | 11 000 | 13200 | 1,2; 0,83 | 1,2310 | 1,4490 |
| 3 000 | 4500 | 1,5; 0,67 | 0,3409 | 0,4897 | 11 000 | 16500 | 1,5; 0,67 | 1,2500 | 1,7960 |
| 3 000 | 6000 | 2; 0,5 | 0,3495 | 0,6472 | 11 000 | 22000 | 2; 0,5 | 1,2820 | 2,3730 |
| 3 000 | 9000 | 3; 0,33 | 0,3669 | 0,9621 | 11 000 | 33000 | 3; 0,33 | 1,3450 | 3,5280 |

Продолжение таблицы А.3

| Растягивающее усилие 1-го ребра, Н | Растягивающее усилие 2-го ребра, Н | Соотношение усилий F2/F1; F1/F2 | Стрела прогиба 1-го ребра, мм | Стрела прогиба 2-го ребра, мм | Растягивающее усилие 1-го ребра, Н | Растягивающее усилие 2-го ребра, Н | Соотношение усилий F2/F1, F1/F2 | Стрела прогиба 1-го ребра, мм | Стрела прогиба 2-го ребра, мм |
|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 5 000 | 1000 | 0,2; 5 | 0,5307 | 0,1338 | 13 000 | 2600 | 0,2; 5 | 1,3800 | 0,3479 |
| 5 000 | 1250 | 0,25; 4 | 0,5310 | 0,1601 | 13 000 | 3250 | 0,25; 4 | 1,3830 | 0,4162 |
| 5 000 | 1667 | 0,33; 3 | 0,5345 | 0,2038 | 13 000 | 4333 | 0,33; 3 | 1,3900 | 0,5299 |
| 5 000 | 2500 | 0,5; 2 | 0,5393 | 0,2913 | 13 000 | 6500 | 0,5; 2 | 1,4020 | 0,7574 |
| 5 000 | 4000 | 0,8; 1,25 | 0,5480 | 0,4488 | 13 000 | 10400 | 0,8; 1,25 | 1,4250 | 1,1670 |
| 5 000 | 4500 | 0,9; 1,11 | 0,5509 | 0,5012 | 13 000 | 11700 | 0,9; 1,11 | 1,4320 | 1,3030 |
| 5 000 | 5000 | 1; 1 | 0,5537 | 0,5537 | 13 000 | 13000 | 1; 1 | 1,4400 | 1,4400 |
| 5 000 | 5500 | 1,1; 0,91 | 0,5566 | 0,6062 | 13 000 | 14300 | 1,1; 0,91 | 1,4470 | 1,5760 |
| 5 000 | 6000 | 1,2; 0,83 | 0,5595 | 0,6587 | 13 000 | 15600 | 1,2; 0,83 | 1,4550 | 1,7130 |
| 5 000 | 7500 | 1,5; 0,67 | 0,5682 | 0,8162 | 13 000 | 19500 | 1,5; 0,67 | 1,4770 | 2,1220 |
| 5 000 | 10000 | 2; 0,5 | 0,5826 | 1,0790 | 13 000 | 26000 | 2; 0,5 | 1,5150 | 2,8040 |
| 5 000 | 15000 | 3; 0,33 | 0,6114 | 1,6040 | 13 000 | 39000 | 3; 0,33 | 1,5900 | 4,1690 |
| 7 000 | 1400 | 0,2; 5 | 0,7429 | 0,1873 | 15 000 | 3000 | 0,2; 5 | 1,5920 | 0,4015 |
| 7 000 | 1750 | 0,25; 4 | 0,7450 | 0,2241 | 15 000 | 3750 | 0,25; 4 | 1,5960 | 0,4802 |
| 7 000 | 2333 | 0,33; 3 | 0,7483 | 0,2853 | 15 000 | 5000 | 0,33; 3 | 1,6040 | 0,6114 |
| 7 000 | 3500 | 0,5; 2 | 0,7550 | 0,4078 | 15 000 | 7500 | 0,5; 2 | 1,6180 | 0,8739 |
| 7 000 | 5600 | 0,8; 1,25 | 0,7672 | 0,6283 | 15 000 | 12000 | 0,8; 1,25 | 1,6440 | 1,3460 |
| 7 000 | 6300 | 0,9; 1,11 | 0,7712 | 0,7017 | 15 000 | 13500 | 0,9; 1,11 | 1,6530 | 1,5040 |
| 7 000 | 7000 | 1; 1 | 0,7752 | 0,7752 | 15 000 | 15000 | 1; 1 | 1,6610 | 1,6610 |
| 7 000 | 7700 | 1,1; 0,91 | 0,7793 | 0,8487 | 15 000 | 16500 | 1,1; 0,91 | 1,6700 | 1,8190 |
| 7 000 | 8400 | 1,2; 0,83 | 0,7833 | 0,9222 | 15 000 | 18000 | 1,2; 0,83 | 1,6790 | 1,9760 |
| 7 000 | 10500 | 1,5; 0,67 | 0,7954 | 1,1430 | 15 000 | 22500 | 1,5; 0,67 | 1,7040 | 2,4490 |
| 7 000 | 14000 | 2; 0,5 | 0,8156 | 1,5100 | 15 000 | 30000 | 2; 0,5 | 1,7480 | 3,2360 |
| 7 000 | 21000 | 3; 0,33 | 0,8560 | 2,2450 | 15 000 | 45000 | 3; 0,33 | 1,8340 | 4,8110 |

Приложение Б

(обязательное)

Копия свидетельства о государственной регистрации для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022617997

Расчет технологических параметров формообразования и правки ребристых панелей раскаткой роликами

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ») (RU)*

Авторы: *Макарук Александр Александрович (RU), Минаев Николай Владимирович (RU), Пашков Андрей Евгеньевич (RU), Пашков Александр Андреевич (RU), Самойленко Олег Викторович (RU), Толстихин Константин Владимирович (RU)*

Заявка № 2022617414

Дата поступления 25 апреля 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 27 апреля 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14c40f0a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

Приложение В (обязательное)

Копия акта внедрения результатов работы

| | |
|---|---|
| |  <p>УТВЕРЖДАЮ Технический директор Филиала ПАО «Ил» – Авиастар</p> <p>С.В. Платонов <i>[Signature]</i></p> <p>09 2023 г.</p> |
| <p>АКТ использования результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ</p> | |
| <p>В рамках исполнения договора № 10/21 от 10 февраля 2021 г. на проведение работ по объекту «Техническое перевооружение и реконструкция производственной базы для изготовления крыла тяжелого военно-транспортного самолета ИЛ-76МД-90А на АО «Авиастар-СП» были выполнены следующие работы:</p> | |
| <p>1. Спроектирована, изготовлена и внедрена в производство установка для формообразования и правки раскаткой роликами УФП-1, предназначенная для</p> <ul style="list-style-type: none"> - образования продольного контура деталей типа длинномерных монолитно-фрезерованных продольно оребренных панелей методом раскатки ребер; - правки подкрепленных деталей каркаса, получивших отклонения контура в процессе изготовления. | |
| <p>2. Разработан комплект технической документации</p> <ul style="list-style-type: none"> - руководство по обслуживанию и эксплуатации установки для УФП-1; - директивный технологический процесс «Формообразование и правка деталей типа «Панель» на установке УФП-1»; - инструкция по подготовке исходных данных для автоматического расчета технологических параметров процесса раскатки роликами рёбер деталей типа «Панель» на установке УФП-1; - методика автоматизированного определения конструктивно-геометрических характеристик участков панелей, подвергаемых формообразованию (правке) раскаткой роликами. | |
| <p>Использование результатов работ способствовало</p> <ul style="list-style-type: none"> - повышению производительности процессов формообразования и правки подкреплённых рёбрами деталей обшивки и каркаса самолета ИЛ-76МД-90А; - повышению точности формы указанных деталей. | |
| <p>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 Филиалу ПАО «Ил» – Авиастар.</p> | |
| <p>От ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» Научный руководитель НИР <i>[Signature]</i> А.Е. Пашков</p> <p>Научный сотрудник <i>[Signature]</i> Н.В. Минаев</p> | <p>От Филиала ПАО «Ил» – Авиастар Директор по строительству и сопровождению ГП ФЦП <i>[Signature]</i> Р.В. Любушкин</p> <p>Ведущий специалист <i>[Signature]</i> А.С. Незванкин</p> |