

На правах рукописи



**МИНАЕВ Николай Владимирович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОРЕБРЁННЫХ ПАНЕЛЕЙ  
РАСКАТКОЙ РОЛИКАМИ И ДРОБЕУДАРНОЙ  
ОБРАБОТКОЙ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Иркутск - 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)

**Научный руководитель:** **Пашков Андрей Евгеньевич**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (г. Иркутск)

**Официальные оппоненты:** **Максименков Владимир Иванович**  
доктор технических наук, профессор кафедры «Самолетостроения» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж)

**Морозов Олег Игоревич**  
кандидат технических наук, и. о. зав. кафедрой «Материаловедение и обработка металлов давлением» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (г. Ульяновск)

**Ведущая организация:** АО «Ульяновский научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства» (АО «Ульяновский НИАТ») (г. Ульяновск)

Защита состоится 23 апреля 2026 года в 12<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.307.01 при ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал. С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» и на официальном сайте университета [www.istu.edu](http://www.istu.edu).

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим выслать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНИТУ; Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.307.01 Н.В. Вулых; e-mail: [vulix2011@yandex.ru](mailto:vulix2011@yandex.ru), тел./факс: 8 (3952) 40-51-17.

Автореферат разослан «9» марта 2026 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



Н.В. Вулых

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### 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, высокотрудоёмкий 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 рёбер. 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 расчёт 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 нерешенных проблем.

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

Для эффективной реализации процесса РР необходимо автоматизированное оборудование, а также специализированное программное обеспечение для расчёта 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 расчёта 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 расчёта 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 расчёта 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 расчётные 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, определяемой 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 регулируемыми параметрами оборудования и позволяющая вы-

полнить 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 расчётных 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 расчётных 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 оребрѐнных 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 прямоугольного и Г-образного сечения. Операция РР выполнялась на установке для формообразования и правки УФП-1 с ЧПУ, операция ДУФ – на дробемѐтной установке контактного типа УДФ-4 с ЧПУ.

#### **Апробация работы**

По теме диссертации в открытой печати опубликовано 15 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 государственной регистрации программ для ЭВМ.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста; состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 110 источников, 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».

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дана краткая характеристика состояния проблемы, обоснована актуальность выполненной работы, определена цель и поставлены задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** приведѐн анализ конструктивных особенностей исследуемых деталей. Рассмотрены существующие способы формообразования, включая применяемое оборудование, а также технологии, используемые в отечественной и зарубежной промышленности для изготовления крупногабаритных панелей двойной кривизны. Проанализированы теоретические и экспериментальные исследования комбинированного технологического процесса формообразования, включающего упругопластическое деформирование и дробеударную обработку.

Методики расчёта технологических параметров и существующие схемы обработки при формообразовании деталей РР рассмотрены в работах В.Т. Сикульского, В.Г. Кононенко, В.А. Захарова, А.А. Макарука и др.

Особенности процесса дробеударного формообразования и существующие подходы к его моделированию представлены в работах Д.А. Журавлева, Дж. Векари (J.A. Vaccari), С. Рамати (S. Ramati), Д.Л. Баугмана (D.L. Vaughman), Р. Коопа, А.А. Пашкова, А.Ю. Дияка и др.

Комбинированный метод формообразования панелей и обшивок, сочетающий упругопластическое деформирование и ДУФ, рассмотрен в работах А.Е. Пашкова, А.Ю. Малащенко, В.И. Макарова, К.Н. Скосоренко, С.В. Викуловой и др.

Показано, что для ребристых панелей со сложным поперечным сечением задача определения технологических параметров комбинированной операции РР–ДУФ не имеет достаточно полного решения.

Наиболее перспективный подход к решению этой задачи – применение специальных программных средств для конечно-элементного анализа, что, однако, требует разработки соответствующих методик моделирования. Кроме того, отсутствие управляемого оборудования для раскатки роликами рёбер длинномерных панелей также сдерживает внедрение данной технологии.

На основе анализа предшествующих исследований были сформулированы цель и задачи диссертационной работы, решение которых позволит достичь поставленной цели.

**Вторая глава** посвящена моделированию процесса формообразования панели с продольным оребрением в технологическом сочетании «раскатка рёбер – дробеударное формообразование» с использованием программного обеспечения LSTC LS-DYNA Version F14.

Прогнозирование продольной кривизны панелей на основе моделирования процесса ДУФ проводилось на КПО панели (рисунок 1).

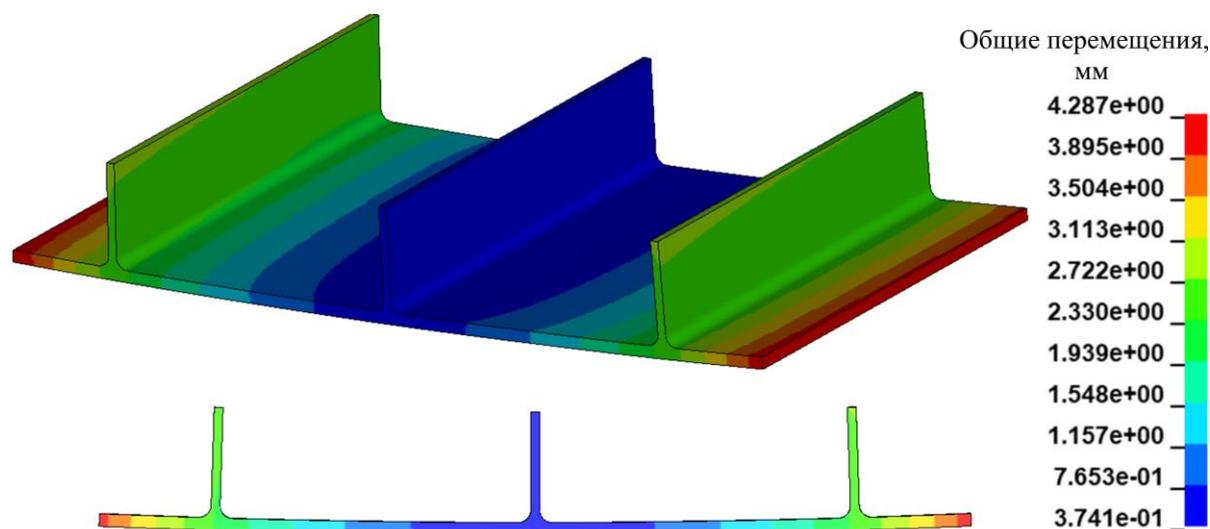


Рисунок 1 – Результат моделирования операции ДУФ на КПО панели

Методом последовательного перебора значений внутренних силовых факторов процесса ДУФ – внутренней силы  $P_{\text{дуф}}$  и координаты её приложения  $Z_c$  из предварительно сформированного фрагмента базы данных (таблица 1) были определены следующие режимы ДУФ.

1. Для получения КПО с радиусом одинарной поперечной кривизны  $R_x^{mp} = 6$  м:  $s = 1\ 050$  мм/мин;  $N_{\text{ДА}} = 800$  мин<sup>-1</sup>;  $t = 8$  с, которым соответствуют внутренние силовые факторы  $P_{\text{дуф}} = 101,2$  Н/мм;  $Z_c = 0,18$  мм. В результате ДУФ КПО приобрёл нежелательную продольную кривизну с радиусом  $R_y^{\text{ДУФ}} = 155$  м ( $k_y^{\text{ДУФ}} = 0,006452$  1/м), которую необходимо компенсировать раскаткой роликами:

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

2. Для получения КПО знакопеременной двойной кривизны с  $R_x^{mp} = 6$  м и  $R_y^{mp} = 25$  м:  $s = 933$  мм/мин;  $N_{\text{ДА}} = 1\ 000$  мин<sup>-1</sup>;  $t_{\text{обр}} = 9$  с, которым соответствуют внутренние силовые факторы  $P_{\text{дуф}} = 139$  Н/мм;  $Z_c = 0,20$  мм. С учётом компенсации нежелательной продольной кривизны, образовавшейся при ДУФ:

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

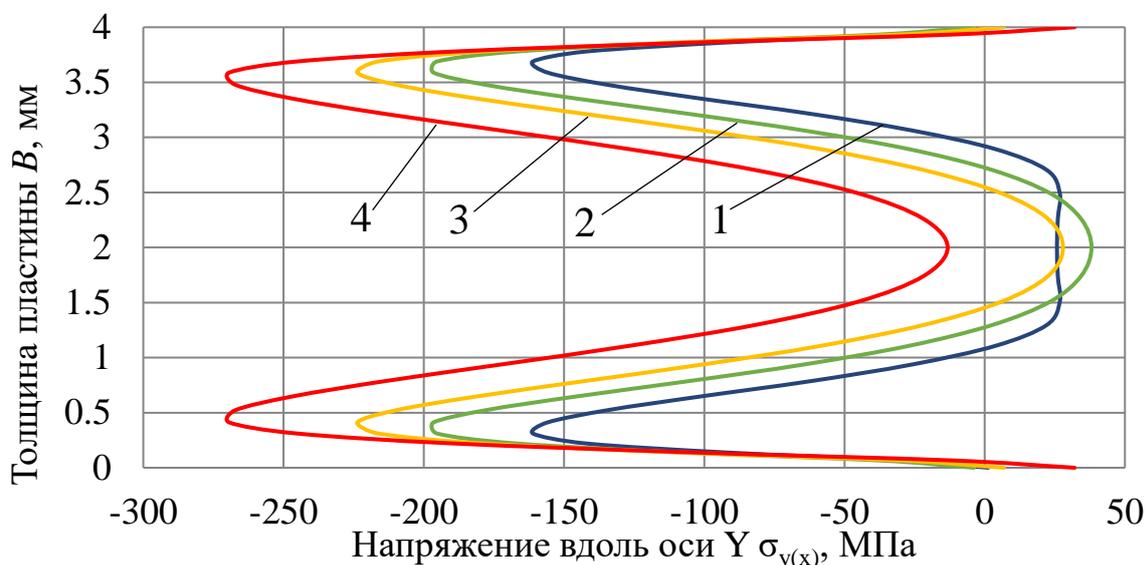
Таблица 1 – Фрагмент базы данных внутренних силовых факторов, возникающих в материале В95пчТ2, в зависимости от режимов обработки

Номер режима обработки	Подача $s$ , мм/мин	Частота вращения дробемётного аппарата $N_{\text{ДА}}$ , мин <sup>-1</sup>	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

Полученные значения служат исходными данными для расчёта режимов раскатки роликами, что обеспечивает формирование предварительной кривизны и полную компенсацию искажений от последующей операции ДУФ.

Моделирование процесса раскатки роликами позволило исследовать НДС материала. Установлено, что при достижении критической глубины

внедрения роликов (0,04 мм) пластическая деформация охватывает всю толщину ребра (рисунок 2). Процесс РР приводит к формированию в материале остаточных сжимающих напряжений, максимальных в направлении раскатки, что положительно влияет на ресурсные характеристики материала.

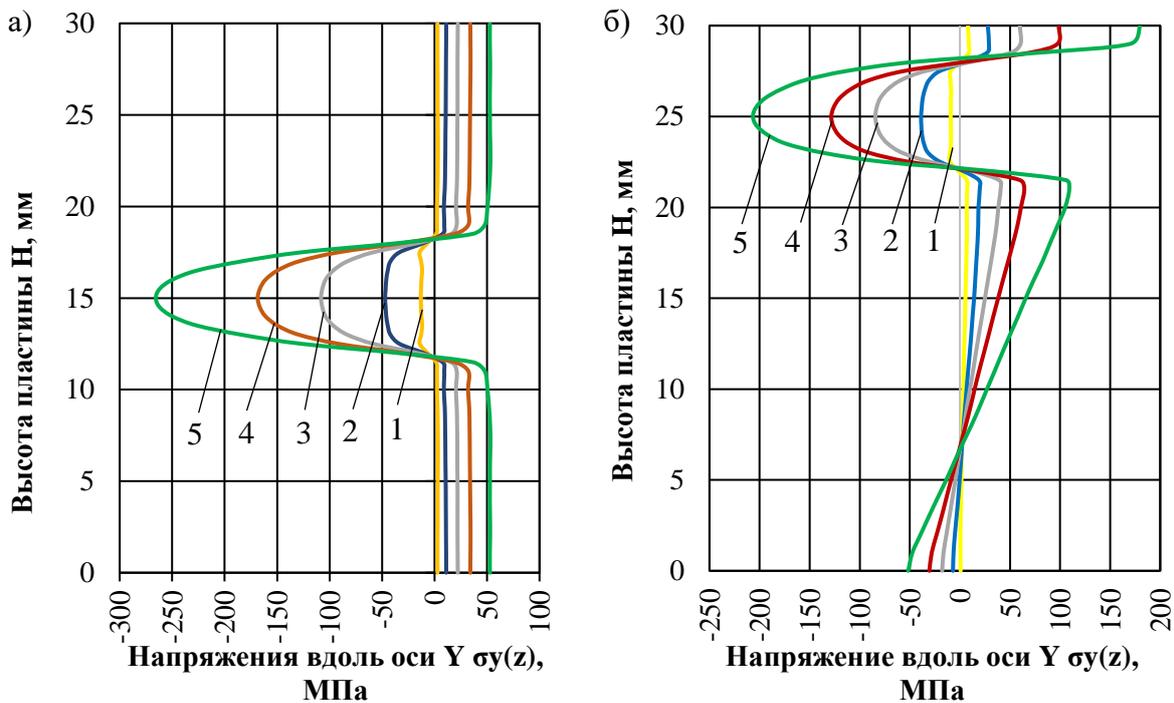


1 – глубина внедрения роликов 0,03 мм; 2 – глубина внедрения роликов 0,0325 мм;  
3 – глубина внедрения роликов 0,035 мм; 4 – глубина внедрения роликов 0,04 мм

Рисунок 2 – 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

Была доказана корректность метода расчёта формоизменения деталей после раскатки роликами, основанного на приложении статической растягивающей силы к центру отпечатка (метод эквивалентного нагружения). Доказательство строится на сопоставлении эпюр остаточных напряжений (ОН), возникающих при внецентровом растяжении брусьев, с эпюрами, полученными после моделирования РР (рисунок 3).

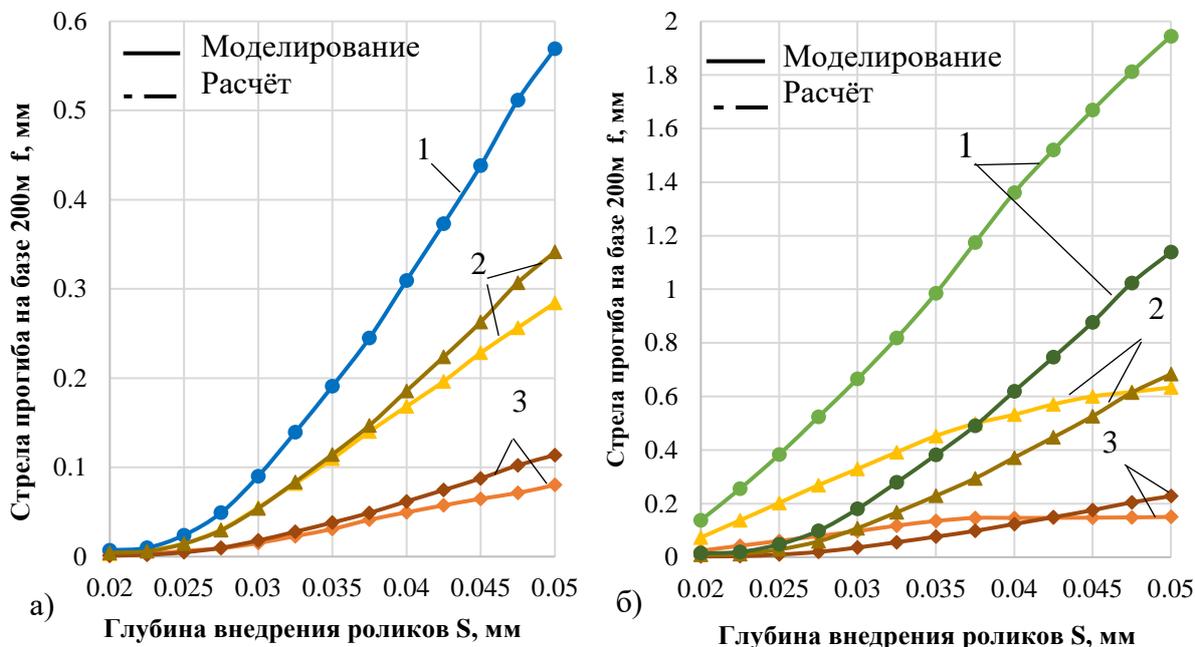
В процессе моделирования также было выявлено, что ключевым условием применимости расчётных моделей процесса РР с эквивалентной растягивающей силой является требование полного геометрического подобия между технологическим образцом и реальной деталью, так как сила определяется по деформации образца и её корректный перенос на деталь возможен только при соблюдении данного условия. Нарушение принципа подобия приводит к значительным погрешностям (рисунок 4). 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%.



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 3 – 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



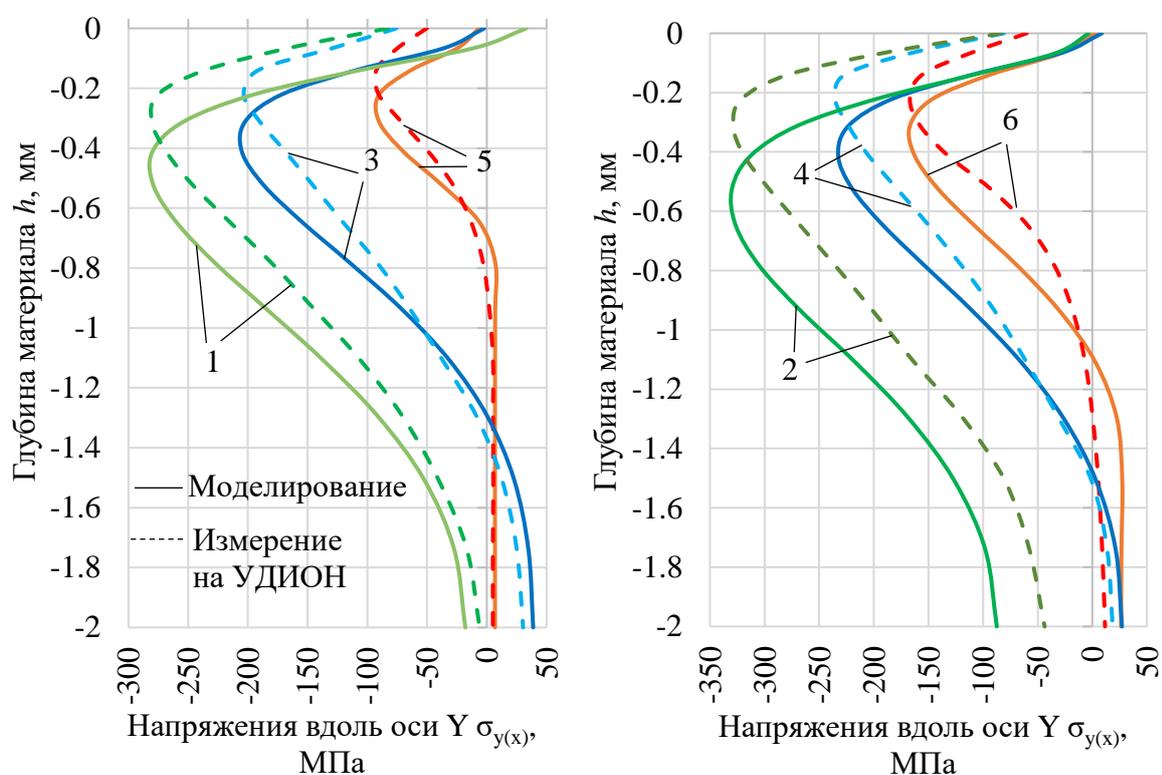
а – толщина образца 4 мм; б – толщина образца 2 мм;

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

Рисунок 4 – 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

Зависимости стрел прогиба образца от глубины внедрения роликов были получены конечно-элементным моделированием и методом эквивалентного нагружения. При этом в методе эквивалентного нагружения сила определялась для каждой глубины внедрения ролика по результатам моделирования РР пластины толщиной 4 мм на расстоянии 10 мм от центра тяжести сечения.

Достоверность разработанной конечно-элементной модели процесса РР была доказана на основании сравнения эпюр ОН, полученных численным моделированием, и экспериментально на образцах механическим методом. Сравнение подтвердило достоверность модели для прогнозирования ОН в материале (рисунок 5). 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.



- 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 5 – 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

Оценка взаимовлияния соседних рёбер при их последовательной обработке РР показала, что взаимовлияние становится существенным, если стрелы прогиба различаются более чем в два раза (рисунок 6).



Рисунок 6 – Зависимость коэффициента  $k$  взаимовлияния рёбер от соотношения стрел прогиба рёбер образца II при их последовательной раскатке роликами

На основании этого предложено определять параметры процесса РР для подкреплённых панелей на расчётных участках (РУ), представляющих собой одно ребро с прилегающими участками полотна шириной, равной расстоянию между соседними рёбрами или до края детали (рисунок 7).

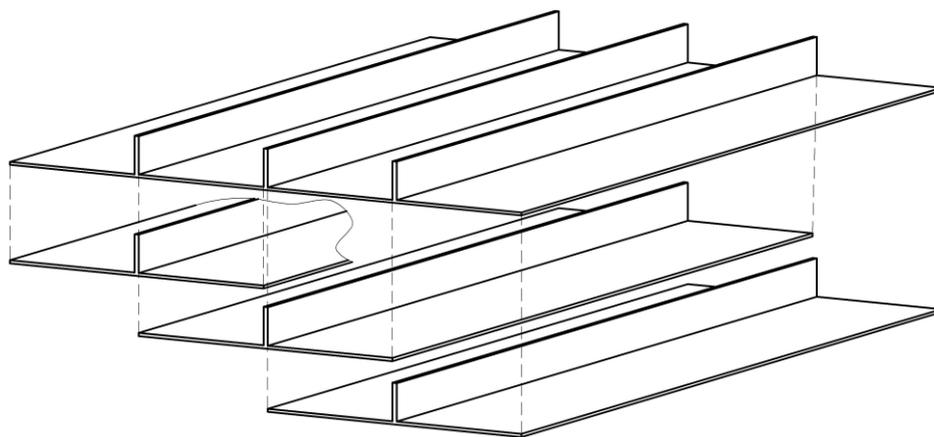


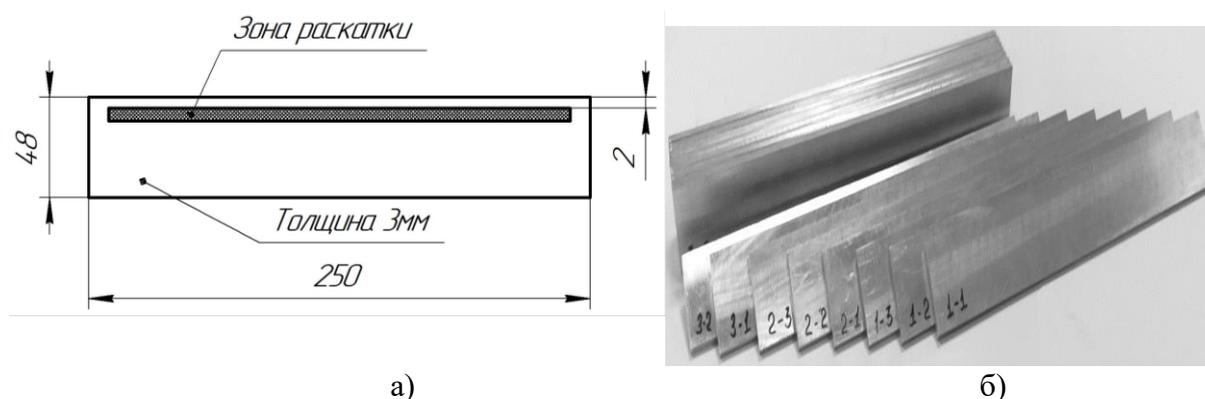
Рисунок 7 – Схема разбиения панели с продольным оребрением на расчётные участки

Количественно взаимовлияние характеризуется коэффициентом  $k$ . При соотношении стрел прогибов соседних рёбер, равном 2, коэффициент  $k=1,168$ . При соотношении 0,3  $k=0,970$ . Наибольшему влиянию подвергается менее деформированное ребро.

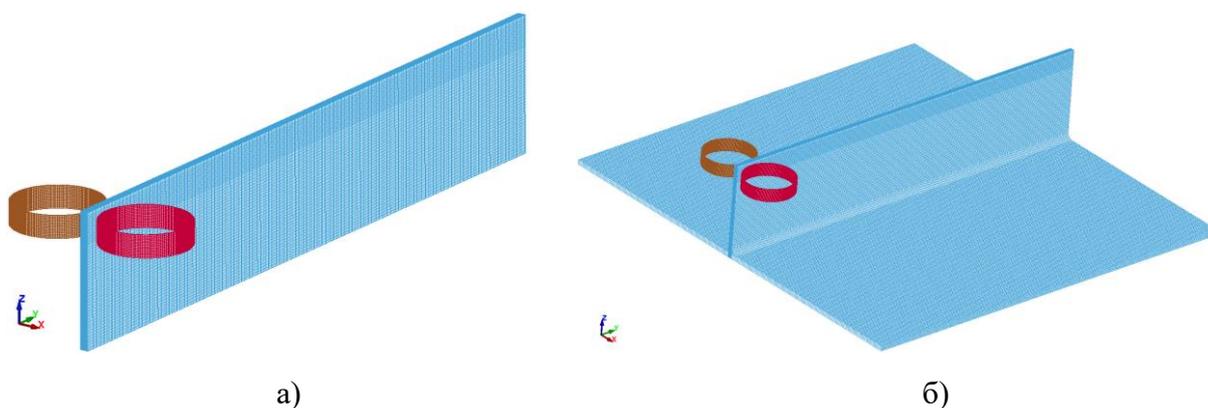
**В третьей главе** исследован технологический процесс формообразования панелей в последовательности «раскатка рёбер – дробеударное формообразование». Описана методика тарирования оборудования для раскатки роликами и проведено исследование процесса формообразования натуральных образцов панелей с ребрами прямоугольного и Г-образного сечений при использовании данной последовательности операций.

Тарирование оборудования для РР выполнялось экспериментальной обработкой пластин (рисунок 8) и конечно-элементным моделированием

этого же процесса (рисунок 9). По результатам моделирования была построена зависимость стрелы прогиба образца от глубины внедрения роликов (рисунок 10, а). Экспериментальные данные представлены в виде зависимости стрелы прогиба от давления в гидросистеме сжатия роликов (рисунок 10, б).



а) — эскизы образца-пластины; б) — образцы пластины  
Рисунок 8 – Образцы для проведения исследований



а) — образец-пластины; б) — образец РУ  
Рисунок 9 – Конечно-элементные модели процесса РР

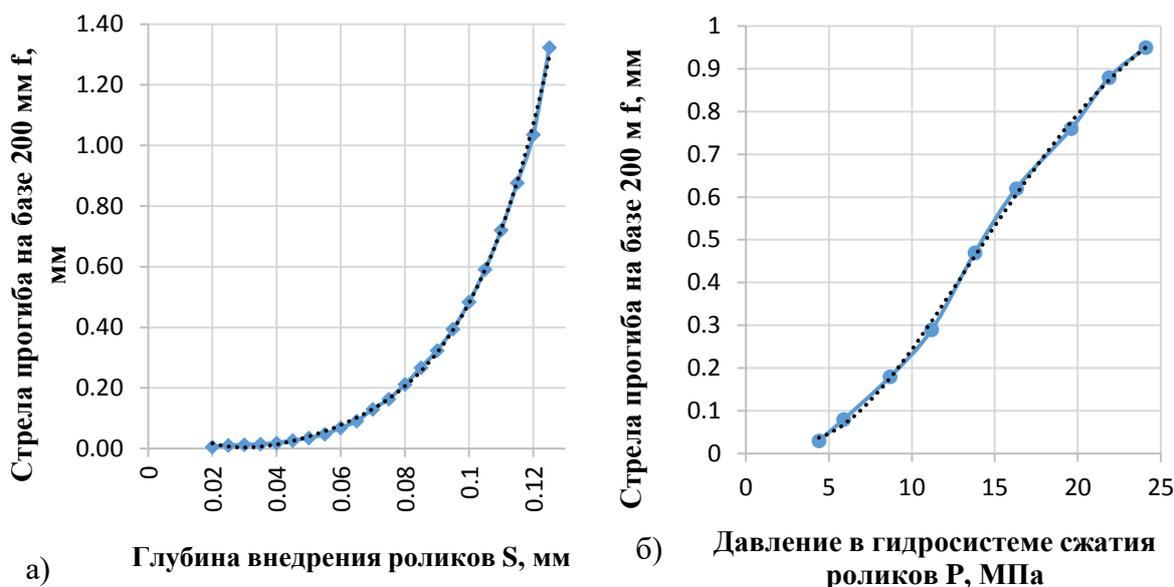
Полученные графики были аппроксимированы полиномами четвёртой степени:

$$f_{\text{пл}}^{\text{ЭК}} = (4 \times 10^{-6})P^4 - 0,0004P^3 + 0,0102P^2 - 0,0572P + 0,1209, \quad (1)$$

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

Через общий параметр, стрелу прогиба, уравнения (1) и (2) были преобразованы к виду, связывающему глубину внедрения  $S$  с давлением  $P$ :

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



а – от глубины внедрения роликов, полученный моделированием; б – от давление в гидросистеме сжатия роликов, полученный при эксперименте

Рисунок 10 – Графики зависимости стрелы прогиба образцов-пластин на базе 200 мм

Таким образом, было получено тарировочное уравнение (3). Оно связывает глубину внедрения роликов  $S$  в материал В95пчТ2 (деформационный фактор процесса РР) с регулировочным параметром оборудования – давлением  $P$  в гидроцилиндре сжатия роликов УФП-1 (в данном случае диаметр роликов 32 мм, их ширина 8 мм). Использование тарировочных уравнений позволяет отказаться от трудоёмкого эмпирического подбора режимов РР с опытной обработкой образцов и перейти к прямому назначению параметров на основе инженерного расчёта. Таким образом, для технологических расчётов и формирования баз данных в дальнейшем можно применять конечно-элементное моделирование процесса РР на образцах, заменяя их натурную обработку.

Достоверность методики подтверждена экспериментальным исследованием формообразования КПО с рёбрами прямоугольного (рисунок 11) и Г-образного (рисунок 12) сечений при выполнении операций в последовательности РР–ДУФ.

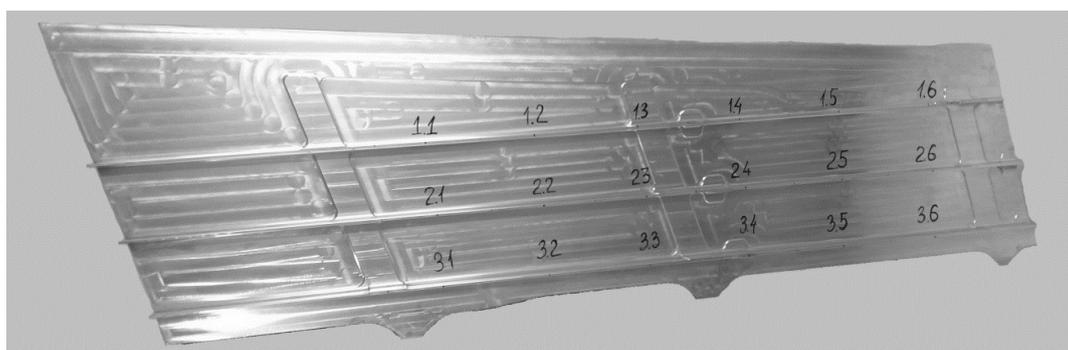


Рисунок 11 – КПО панели с рёбрами прямоугольного сечения (из сплава В95пчТ2, габаритные размеры 1950x545x50 мм)



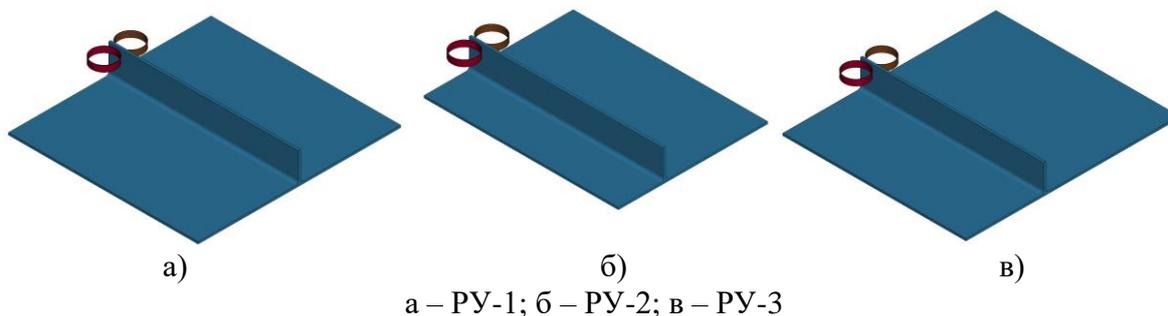
Рисунок 12 – КПО панели с рёбрами Г-образного сечения (из сплава В95пчГ2 габаритные размеры 1000x1000x50 мм)

Для расчётных участков КПО панелей (рисунок 13) методом конечно-элементного моделирования получены деформационные уравнения, связывающие стрелы прогиба с глубиной внедрения роликов:

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

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

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



а – PY-1; б – PY-2; в – PY-3

Рисунок 13 – Конечно-элементная модель расчётных участков КПО панели с прямыми рёбрами

До и после каждой операции обработки КПО проводились измерения поперечных и продольных стрел прогиба ( $f_y, f_x$ ) в точках, расположенных по осям рёбер. Окончательный контроль поперечной кривизны выполнялся с помощью шаблона контура сечения, применяемого для контроля серийных деталей, и комплекта щупов. На основе тарифовочных и деформационных уравнений с учётом предварительно измеренных стрел прогиба были рассчитаны режимы обработки КПО.

Результаты измерений показали, что после обработки КПО панели с рёбрами прямоугольного сечения в последовательности РР–ДУФ была достигнута требуемая форма поверхности. Максимальное отклонение контура составило не более 6% в продольном направлении и не более 9% в поперечном направлении. Аналогичные результаты для КПО с рёбрами Г-образного

сечения показали отклонения не более 7% и 9% соответственно. Таким образом, разработанная методика расчёта обеспечивает достаточную точность и может быть использована для технологических расчётов применительно к реальным деталям. Также установлено, что форма сечения ребра не оказывает существенного влияния на точность расчётов.

В четвертой главе представлена практическая реализация результатов исследования. Изложена методика расчёта технологических параметров процесса РР при формообразовании панелей в последовательности РР–ДУФ, дано описание расчётной программы и представлены результаты разработки соответствующего технологического процесса.

Блок-схема алгоритма расчёта режимов обработки представлена на рисунке 14.

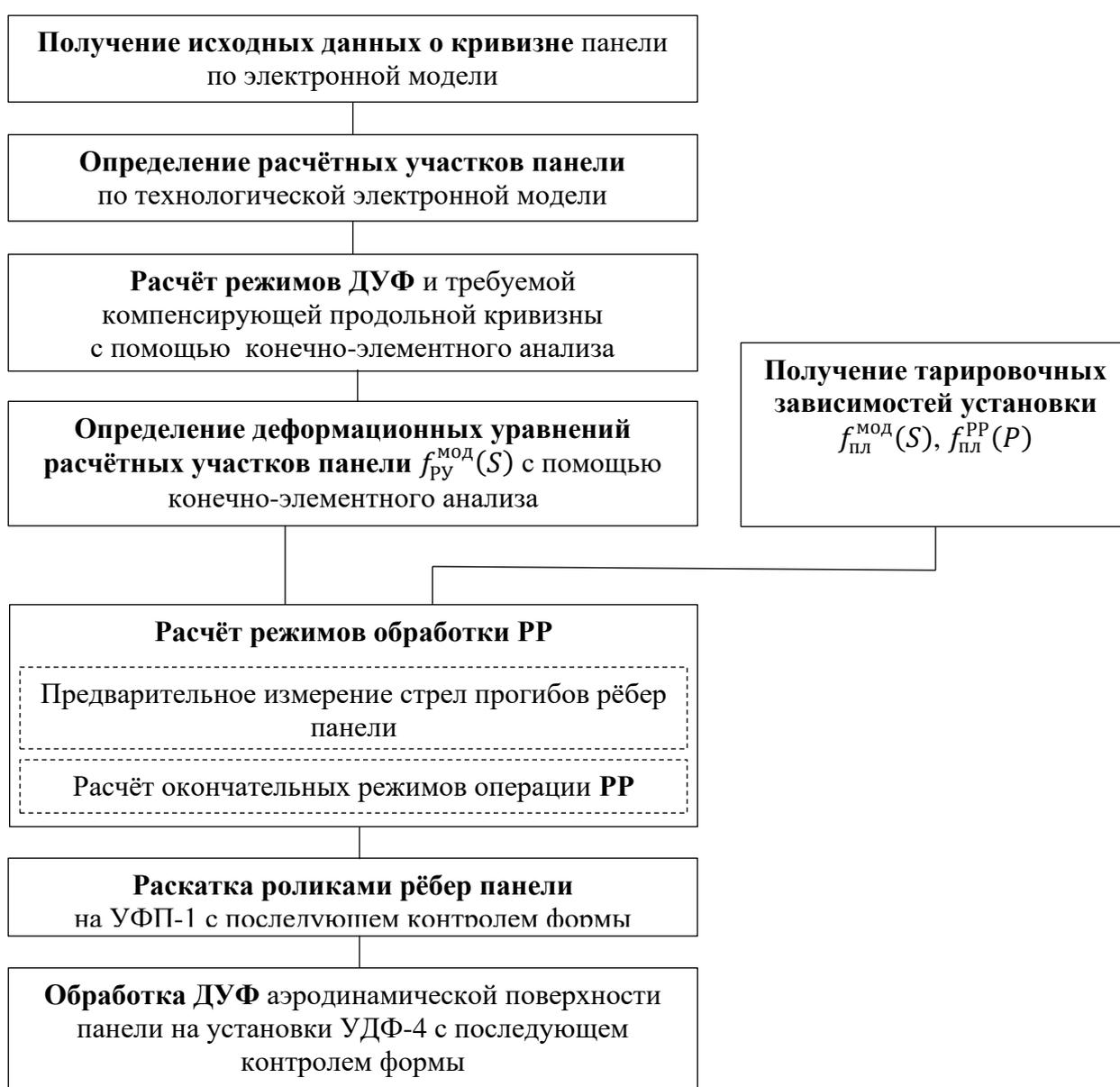


Рисунок 14 – Блок-схема последовательности действий расчёта режимов и обработки при формообразовании в последовательности РР–ДУФ

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

Цель расчёта – определение настроечных параметров оборудования для раскатки рёбер панелей.

Исходными данными для расчёта технологических параметров процесса РР являются:

- электронная модель формообразуемой панели, содержащая необходимую геометрическую информацию;
- результаты определения режимных параметров и внутренних силовых факторов процесса ДУФ (формируемая в данном процессе кривизна считается положительной);
- тарифовочное уравнение, связывающее глубину внедрения роликов  $S$  с регулировочными параметрами технологического оборудования;
- результаты предварительного измерения продольной кривизны панели (измерение производится в вертикальном положении).

В основе расчётов лежат две модели: электронная (отражает окончательные форму и размеры изделия, перед сборкой) и технологическая (представляет собой деталь с плоской аэродинамической поверхностью, предназначенную для фрезерования и последующего формообразования).

Для автоматизации трудоёмких расчётов было разработано специальное программное обеспечение (рисунок 15).

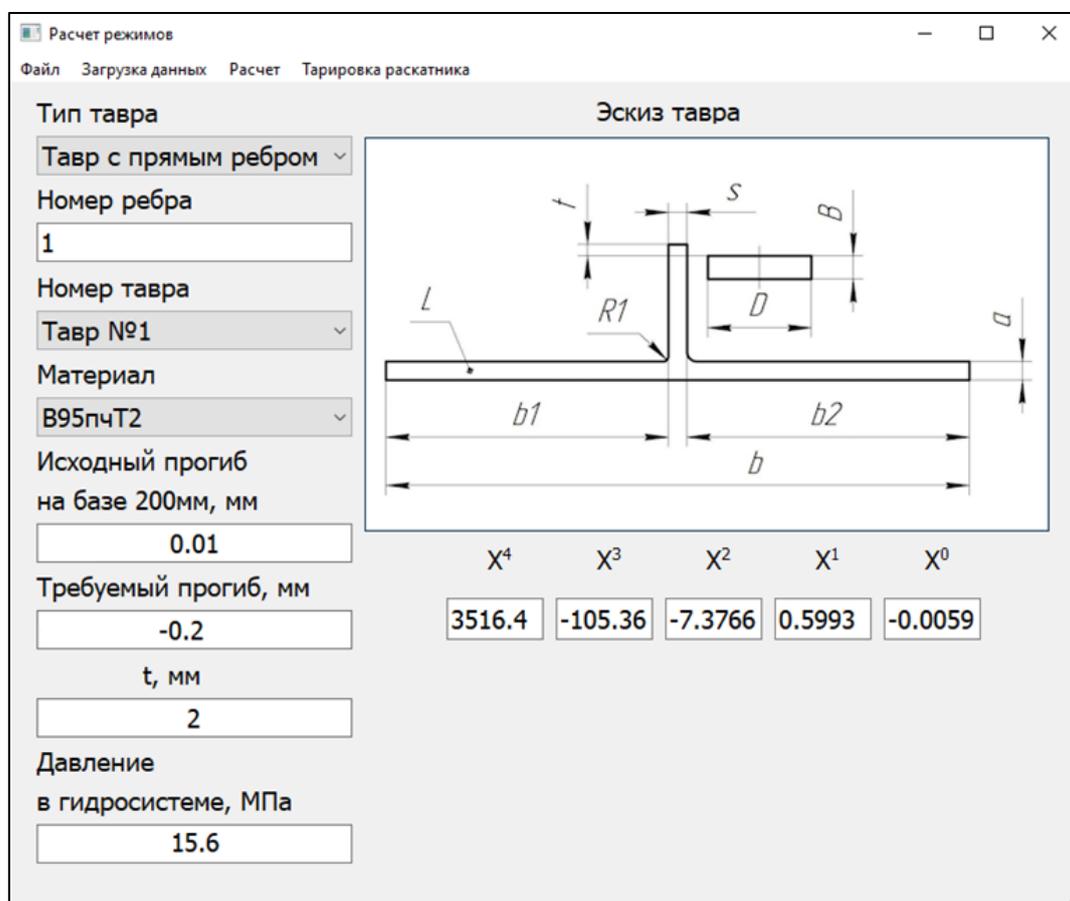


Рисунок 15 – Интерфейс программы по расчёту режимов обработки

Программное обеспечение выполняет следующие функции:

- создание файлов моделей для конечно-элементного моделирования процесса РР;
- обработка результатов моделирования с последующим формированием тарировочных и деформационных уравнений;
- расчёт режимов обработки РР для получения требуемой кривизны с учётом исходной деформации;
- генерация управляющей программы для технологического оборудования.

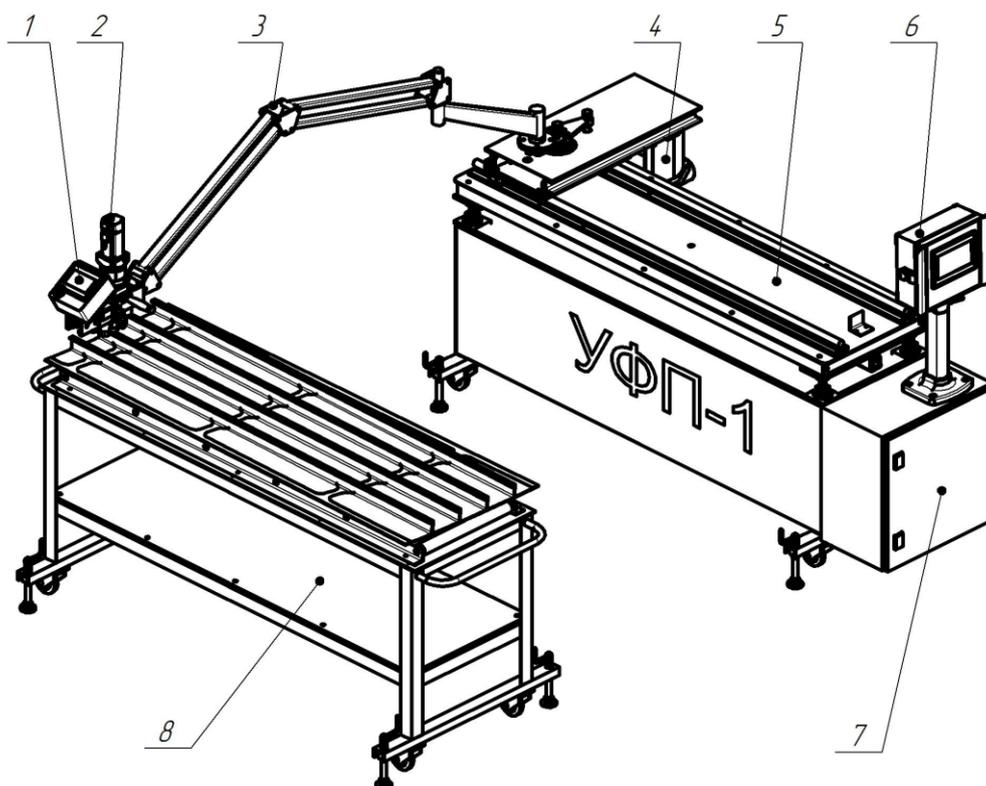
Разработанное оборудование для раскатки рёбер монолитно-фрезерованных панелей показано на рисунках 16 и 17.

Разработанный технологический процесс формообразования по схеме РР–ДУФ внедрён в серийное производство и обеспечен полным комплектом технологической документации.

Операция раскатки роликами направлена на формирование продольной кривизны и компенсацию нежелательных деформаций, обусловленных ДУФ. Обработка ведётся по программируемой траектории от периферийных рёбер к центральным в два прохода: на первом достигается 70-90% от требуемой кривизны, на втором выполняется окончательная доводка.



Рисунок 16 – 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 17 – Установка УФП-1

Операция ДУФ выполняется на установках серии УДФ и заключается в дробеударной обработке дробью наружной поверхности панели, закреплённой в вертикальном положении. Операция реализуется в две стадии: предварительное автоматизированное формообразование (до 60-80% кривизны) и окончательная доводка в ручном режиме с увеличенной подачей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 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 процесса с использованием САЕ систем и автоматизированного оборудования, что обеспечило повышение эффективности производства и качества деталей.

В результате исследования получены научные и практические результаты.

1. Разработана методика определения исходных данных для расчёта технологических параметров процесса формообразования панелей раскаткой рёбер роликами. 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, сформированной путём конечно-элементного моделирования процесса ДУФ с различными режимами обработки.

3. Произведена оценка взаимовлияния 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 закономерностей 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 тарировочных уравнений, связывающих глубину внедрения роликов с 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, созданная с участием автора, 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.

Перспективы дальнейших исследований:

- расширение номенклатуры материалов обрабатываемых деталей (например, титановые сплавы, 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.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. Пашков, А. Е. Моделирование технологической последовательности раскатки роликами - дробеударное формообразование подкрепленных панелей / А. Е. Пашков, А. А. Макарук, **Н. В. Минаев** // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2025. – № 3(780). – С. 57-68.
2. Методика расчета технологических параметров превентивного деформирования упрочняемых деталей типа «стенка» / А. А. Макарук, О. В. Самойленко, **Н. В. Минаев** [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2021. – Т. 25, № 1(156). – С. 8-16.
3. **Минаев, Н. В.** Проблемы измерения остаточных напряжений на образцах конструктивно подобных элементов алюминиевых деталей после раскатки роликами / **Н. В. Минаев**, А. Г. Тихонов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 4(52). – С. 84-88.
4. Макарук, А. А. Повышение эффективности формообразования и правки маложестких подкрепленных ребрами деталей раскаткой роликами / А. А. Макарук, **Н. В. Минаев** // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 12(107). – С. 63-70.
5. Макарук, А. А. К разработке автоматизированной технологии формообразования и правки маложестких деталей раскаткой роликами / А. А. Макарук, **Н. В. Минаев** // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 3(86). – С. 45-50.
6. Макарук, А. А. Технология формообразования и правки маложестких деталей раскаткой роликами / А. А. Макарук, **Н. В. Минаев** // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 6-2. – С. 404-408.

### **В международном издании, включенном в международную реферативную базу данных Web of Science**

7. Pashkov, A. Y. Automation methods for forming and rectifying stiffened parts with rolling machines / A. Y. Pashkov, A. A. Makaruk, **N. V. Minaev** // International Journal of Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 7, No. 6. – P. 2030-2037.

### **В прочих изданиях**

8. **Минаев, Н. В.** К созданию предсказательной модели процесса формообразования и правки подкреплённых панелей раскаткой роликами /

Н. В. Минаев // Современные авиационные технологии. International Conference on Aviation Engineering : Материалы XVI международной научно-практической конференции (г. Иркутск, 03–07 июля 2023 г.). – Иркутск: ИРННТУ, 2023. – С. 15-25.

9. Повышение эффективности формообразование и правки маложестких деталей раскаткой роликами / А. А. Макарук, А. В. Богданов, Н. В. Крючкин, **Н. В. Минаев** // Наука и технологии в промышленности. – 2013. – № 1-2. – С. 101-103.

10. **Минаев, Н. В.** Формообразование подкрепленных панелей раскаткой роликами / Н. В. Минаев // Высокоэффективные технологии производства летательных аппаратов : сборник докладов (г. Иркутск, 10–11 апреля 2012 г.) / Под общей редакцией А.Ю. Дьяка.. – Иркутск: ИРННТУ, 2012. – С. 94-100.

11. Макарук, А. А. Технология формообразования и правки маложестких деталей методами местного пластического деформирования / А. А. Макарук, **Н. В. Минаев** // Высокоэффективные технологии проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолетов : Всероссийский (с международным участием) научно-практический семинар (г. Иркутск, 09–11 ноября 2011 г.). – Иркутск: ИРННТУ, 2011. – С. 117-121.

#### Патент

12. Патент № 120909 U1 Российская Федерация, МПК В24В 39/00. Устройство для обкатывания рёбер панелей / А. Е. Пашков, А. А. Лихачев, В. П. Кольцов, **Н. В. Минаев** ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ИрГТУ», ОАО «Корпорация «Иркут». – № 2011148134/02 ; заявл. 28.11.2011 ; опубл. 10.10.2012.

#### Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

13. Свидетельство № 2022617997, Российская Федерация. Расчет технологических параметров формообразования и правки ребристых панелей раскаткой роликами / А. А. Макарук, **Н. В. Минаев**, А. Е. Пашков [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРННТУ» № заявки 2022617414, заявл. 25.04.2022; опубл. 27.04.2022.

14. Свидетельство № 2016611514, Российская Федерация. Программное обеспечение для автоматического определения технологических параметров при правке авиационных деталей раскаткой роликами / А. А. Макарук, Д. Е. Андряшин, **Н. В. Минаев**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРННТУ», ПАО «Корпорация «Иркут» № заявки 2015662180, заявл. 14.12.2015; опубл. 04.02.2016.

15. Свидетельство № 2016611626, Российская Федерация. Программный модуль расчета параметров раскатки рёбер при формообразовании длинномерных панелей / Д. Е. Андряшин, **Н. В. Минаев**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРННТУ», ПАО «Корпорация «Иркут» № заявки 2015662066, заявл. 10.12.2015; опубл. 08.02.2016.

Подписано в печать 13.02.2026. Формат 60 x 90 / 16.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,5.  
Тираж 100 экз. Зак. 10. Поз. плана 2н.  
Отпечатано в типографии Издательства  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83