

На правах рукописи



Погарцева Мария Михайловна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МЕТОДАМИ ИЗГИБА
С РАСТЯЖЕНИЕМ И ПОСЛЕДУЮЩИМ УДАЛЕНИЕМ
ЧАСТИ МАТЕРИАЛА**

Специальность 05.07.02

Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2020

Работа выполнена на кафедре «Технология самолетостроения» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель: **Феоктистов Сергей Иванович**,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Технология самолетостроения»
ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
государственный университет»

Официальные оппоненты: **Чумадин Анатолий Семёнович**,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Технология производства летатель-
ных аппаратов» ФГБОУ ВО «Московский авиа-
ционный институт (национальный исследова-
тельский университет)» (г. Москва)

Бобин Константин Николаевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры
самолето- и вертолетостроения ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный технический
университет» (г. Новосибирск)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
(г. Иркутск)

Защита состоится «15» мая 2020 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.06 при ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д. 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на сайте www.knastu.ru

Отзывы на автореферат в двух экземплярах (заверенных печатью учреждения) просим присылать по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д. 27, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», ученому секретарю диссертационного совета Д 212.092.06.

Автореферат разослан «___» апреля 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.092.06,
кандидат физико-математических наук

Д.А. Потянихин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Среди деталей авиационных конструкций существует класс тонкостенных деталей, которые изготавливают на обтяжных прессах с числовым программным управлением. Это детали типа обшивок и элементов шпангоутов, которые получают методом изгиба с растяжением из листовых и профильных заготовок. Указанные детали формируют теоретический контур летательного аппарата и к ним предъявляются высокие требования по точности. Изготовление деталей с заданной точностью геометрических параметров их формы обеспечивается соответствующей оснасткой технологического процесса и кинематикой управляющих органов обтяжного пресса.

Для формообразования заготовок на обтяжных прессах в качестве технологической оснастки используется обтяжной пуансон. В настоящее время обтяжной пуансон изготавливается по электронным моделям деталей без учета пружинения материала. При этом упругое восстановление материала (пружинение) может оказывать значительное влияние на точность изготовления детали.

Большинство деталей типа обшивок и элементов шпангоутов имеют не только переменную кривизну, но и переменную толщину или переменную геометрию стенки и полки, поэтому технологический процесс изготовления этих деталей включает ряд технологических операций по удалению части материала (например, размерное химическое травление). В результате удаления части материала с формообразованной заготовки за счет перераспределения остаточных напряжений также могут возникать искажения конечной формы готовой детали.

Таким образом, задача по определению величин пружинений деталей летательных аппаратов переменной кривизны после формообразования их методами изгиба с растяжением на обтяжных прессах из листовых или профильных заготовок и последующим удалением части материала является весьма актуальной. Это позволит предсказать поведение формообразованных заготовок и правильно спроектировать формы обтяжных пуансонов на этапе технологической подготовки производства изготовления деталей летательных аппаратов, и как следствие, повысить точность их изготовления.

Степень разработанности темы исследования.

Теоретические основы расчета напряженно-деформированного состояния листовых и профильных заготовок при изгибе представлены в работах А.А. Ильюшина, М.И. Лысова, М.Н. Горбунова, С.И. Вдовина, В.И. Ершова, Е.А. Попова, С.И. Феоктистова, А.Н. Громовой, В.И. Завьяловой, В.К. Коробова, В.В. Москвитина, Н.Н. Малинина и др. Часть указанных работ посвящена изучению явления эффекта Баушингера при циклическом нагружении. Наиболее современные исследования, основанные на конечно-элементном анализе, отражены в работах С.С. Одингга, А.И. Олейникова, К.С. Бормотина, С.В. Сурудина.

Практически отсутствуют работы, в которых учитывается схема нагружения заготовки с учетом эффекта Баушингера и возможность последующего удаления части материала. Как следствие, отсутствуют методики и алгоритмы определения изменения геометрии формообразованной заготовки после удаления части материала под действием остаточных напряжений.

Фирмы-производители обтяжных прессов с числовым программным управлением (в частности, французская фирма АСВ) поставляют заказчику совместно с приобретаемым оборудованием программное обеспечение для создания управляющих программ (УП) по электронным моделям обтяжных пуансонов. Данное программное обеспечение для программирования обтяжных прессов с числовым программным управлением основывается на математической модели, в которой пренебрегают влиянием изгибающих моментов и не учитывают схему нагружения заготовки (последовательность применения операций изгиба, растяжения и их комбинаций) и связанных с этим физических эффектов.

Кроме того, эта математическая модель не позволяет учесть и спрогнозировать искажения формы детали за счёт перераспределения остаточных напряжений в процессе удаления части материала с ранее деформированной заготовки.

Таким образом, для решения задачи требуется разработать методику расчета напряженного деформированного состояния заготовки, учитывающую схему нагружения и физические эффекты, сопровождающие процесс формообразования, а также позволяющую учесть пружинение детали при удалении части материала.

Для реализации разработанной математической модели на практике требуется разработка программного модуля расчета траектории перемещения зажимных губок обтяжного пресса для формирования УП.

Целью диссертационной работы является исследование влияния последовательности применения операций изгиба и растяжения на напряженно-деформированное состояние листовых и профильных деталей летательных аппаратов при формообразовании на обтяжных прессах и последующем удалении части материала.

Задачи исследования:

1. Совершенствование методики определения напряженно-деформированного состояния при изгибе с растяжением с учетом схемы нагружения заготовки и эффекта Баушингера.

2. Исследование влияния схемы нагружения и эффекта Баушингера на конечную форму деталей летательных аппаратов, получаемых методами изгиба с растяжением на обтяжных прессах.

3. Исследование влияния удаления части материала формообразованной заготовки на пружинение детали.

4. Разработка методики расчета управляющих параметров для процесса формообразования деталей типа обшивок и шпангоутов на обтяжных прессах с числовым программным управлением.

5. Проведение экспериментальных исследований для оценки достоверности результатов математического моделирования.

Научная новизна исследования

1. Разработана математическая модель технологического процесса формообразования деталей летательных аппаратов методами изгиба с растяжением на обтяжных прессах с числовым программным управлением с учетом схемы нагружения заготовки (то есть последовательности применения операций изгиба, растяжения и их комбинаций) и эффекта Баушингера.

2. Предложена методика расчёта конечной формы детали с учётом пружинения вследствие удаления части материала формообразованной заготовки.

3. Создана методика расчёта управляющих параметров для реализации на обтяжном прессе с числовым программным управлением схемы нагружения, обеспечивающей большую геометрическую точность изготовления детали.

Теоретическая значимость работы состоит в совершенствовании методов расчета напряженно-деформированного состояния деталей летательных аппаратов с учетом схемы нагружения и эффекта Баушингера в процессе формообразования методами изгиба с растяжением на обтяжных прессах и последующим удалением части материала.

Практическая значимость работы заключается в повышении точности изготовления деталей летательных аппаратов методами изгиба с растяжением на обтяжных прессах по УП, рассчитанным с применением разработанных методик. Это позволяет повысить качество и уменьшить сроки технологической подготовки производства при освоении новых деталей летательных аппаратов.

Методология и методы исследования. Поставленные в работе задачи решались численно-аналитическими методами теории обработки металлов давлением применительно к процессам изготовления деталей методами изгиба с растяжением. Для создания программных модулей на основе разработанных методик использовано программное обеспечение MathCAD. Для проведения конечно-элементного моделирования процесса формообразования деталей использовалась САЕ система MSC.Marc. Экспериментальные исследования проводились в производственных условиях на обтяжном прессе Т-600 с числовым программным управлением.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель и комплексная методика расчета напряженно-деформированного состояния заготовок деталей летательных аппаратов при формообразовании методом изгиба с растяжением, учитывающие влияние схемы нагружения и эффекта Баушингера на пружинение материала.

2. Методика определения остаточных напряжений и конечной формы детали после удаления части материала формообразованной заготовки.

3. Методика расчета управляющих параметров для обтяжного пресса с числовым программным управлением с учетом его геометрических параметров и кинематики пресса.

4. Результаты численно-аналитического исследования схем формообразования с последующим удалением части материала.

Степень достоверности научных положений и выводов, приведенных в работе, подтверждается удовлетворительным совпадением результатов расчётов по численно-аналитической методике, результатов конечно-элементного моделирования и натуральных экспериментов. Получена их согласованность при разработке различных схем деформирования.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на следующих научных мероприятиях:

1 XV краевой конкурс молодых ученых и аспирантов (Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, 2013 г.).

2 XVI краевой конкурс молодых ученых и аспирантов (Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, 2014 г.).

3 Третья всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов (Филиал ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина», Комсомольск-на-Амуре, 2014 г.).

4 III Всероссийская научно-практическая конференция «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск, 2013 г.).

5 IV Всероссийская научно-практическая конференция «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск, 2014 г.).

6 Конкурс научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых «Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета» Наука молодых – основа будущего России (г. Комсомольск-на-Амуре, 2014 г.).

7 XV Всероссийская научно-техническая конференция и школа молодых ученых, аспирантов и студентов «Авиакосмические технологии» (г. Воронеж, 2014 г.).

8 Международный симпозиум «Наука. Инновации. Техника и технологии: проблемы, достижения и перспективы» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2015 г.).

9 Пятая всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов (Филиал ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина», Комсомольск-на-Амуре, 2018 г.).

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении договора НИОКР №86-4/12 от 05.12.2012 г. «Совершенствование методов, технологии и оснастки, разработка управляющих программ для изготовления деталей обтяжкой на прессах с числовым программным управлением» в Филиале ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина» г. Комсомольск-на-Амуре. Результаты, полученные в рамках выполнения НИОКР №86-4/12 от 05.12.2012 г. «Совершенствование методов, технологии и оснастки, разработка управляющих программ для изготовления деталей обтяжкой на прессах с числовым программным управлением», внедрены в производство цеха 26 Филиала ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина» г. Комсомольск-на-Амуре.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 работ, в том числе три статьи из перечня изданий, определенных ВАК РФ, одна статья включена в базу цитирования Scopus.

Личный вклад автора. Основные теоретические положения, экспериментальные результаты и практические разработки получены автором самостоятельно. Автор лично составил алгоритмы и программы расчетов, выполнил, обработал и проанализировал все теоретические исследования. Часть теоретических исследований получены в соавторстве, что отражено в списке опубликованных работ. Натурные эксперименты проведены по УП, разработанным автором. Измерение и обработка результатов эксперимента выполнена лично автором.

Соответствие паспорту специальности.

Научные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, соответствуют трём пунктам паспорта специальности 05.07.02 – «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов» (технические науки).

П.11. Технологическая подготовка производства объектов авиационной и ракетно-космической техники, включая:

- системы и средства автоматизированной подготовки производства.

П.15. Технологические процессы проектирования, программирования и информационного обеспечения при производстве летательных аппаратов, двигателей и их составных частей, включая технологию и средства:

- автоматизированного проектирования технологических процессов и управления ими;
- математического моделирования технологических процессов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех основных глав, результатов работы, списка литературы и приложений. Работа изложена на 120 страницах машинописного текста, содержит 69 рисунков, 3 таблицы, список литературы из 70 наименований и 5 приложений на 66 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведён анализ наиболее распространенных процессов формообразования листовых и профильных заготовок в производстве деталей летательных аппаратов, перечислены их особенности и технологические возможности производственного оборудования. Дан конструктивно-технологический анализ изделий, получаемых методами изгиба с растяжением.

Обзор литературных источников и научных трудов показал, что наиболее распространенным и производительным методом в производстве деталей авиационных конструкций из листов и профилей является метод изгиба с растяжением.

По результатам анализа основных методов определения напряженно-деформированного состояния при изгибе с растяжением выявлены недостатки в существующих методиках и выбраны гипотезы расчета в данной работе.

Для повышения точности расчета напряженно-деформированного состояния предложено использовать модель материала с учётом влияния эффекта Баушингера.

Во второй главе рассмотрена технологическая подготовка производства деталей летательных аппаратов переменной кривизны с применением современного обтяжного оборудования с числовым программным управлением, которая включает разработку УП. Существующие программные инструменты и способы расчета УП ни всегда обеспечивают точного изготовления деталей, что увеличивает цикл их производства из-за доработки вручную и поиска оптимальных режимов формообразования и корректировки УП. Для сокращения времени подготовки производства разработана методика создания УП, основанная на расчете напряжённо-деформированного состояния материала заготовки при её деформировании, учитывающем влияние схемы нагружения и эффекта Баушингера (рисунок 1).

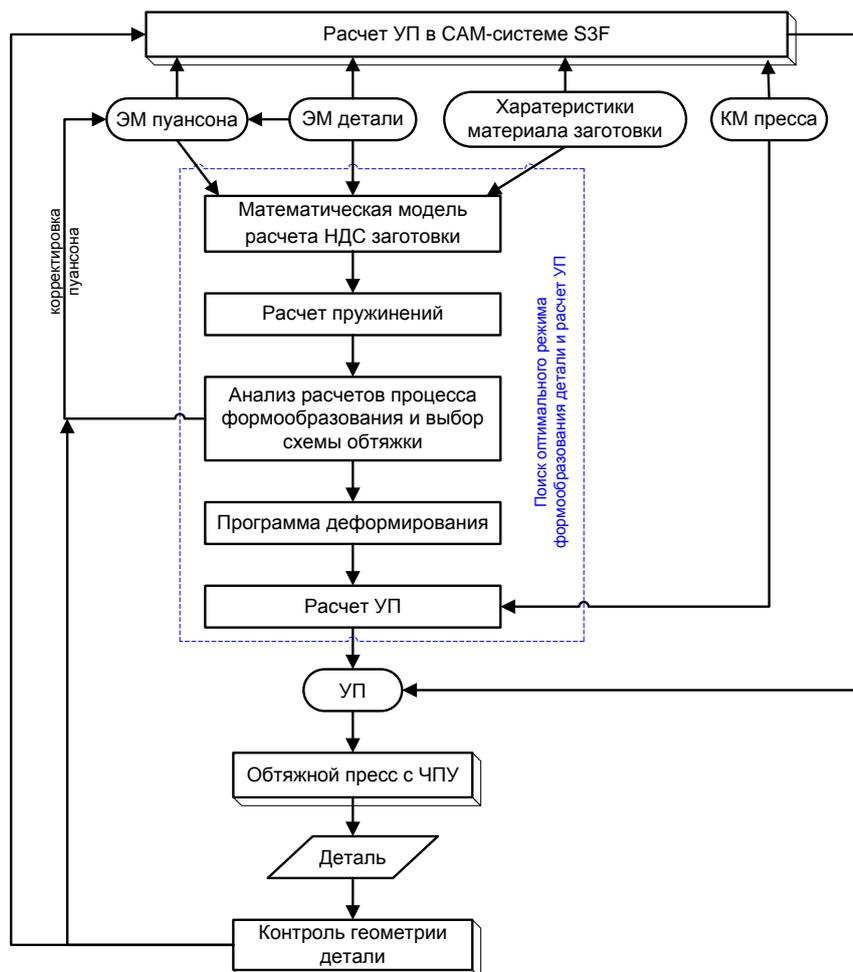


Рисунок 1 – Схема процесса создания управляющих программ

При реализации этой методики решался ряд задач рассмотренных в следующих разделах:

В разделе 2.1 рассмотрены особенности расчёта напряжённо-деформированного состояния для различных схем нагружения.

При определении положения нейтрального слоя используются следующие условия:

- условия равновесия внутренних сил в сечении заготовки:

$$\int_F \sigma_{и} dF = 0, \quad (1)$$

где $\sigma_{и}$ – нормальные напряжения в поперечном сечении, возникающие вследствие изгиба;

$F = B \cdot H$ – площадь поперечного сечения заготовки (B и H – ширина и толщина заготовки соответственно).

- условия равновесия растягивающей силы P и внутренних сил, действующих в сечении заготовки:

$$\int_F \sigma_{p1-и} dF = P. \quad (2)$$

где $\sigma_{p1-и}$ – нормальные напряжения в поперечном сечении, возникающие вследствие изгиба после предварительного растяжения.

Процесс «растяжение – изгиб» (P1-И) характеризуется тем, что первоначально создается равномерная по сечению деформация растяжения, и затем при сохранении постоянства растягивающей силы производится изгиб заготовки по пуансону соответствующей кривизны. Деформации и соответствующие напряжения определяются соотношениями

В зоне сечения, расположенной выше нейтрального слоя

$$\begin{aligned} \varepsilon_{p1-и} &= \varepsilon_{p1} + \varepsilon_{и}; \\ \sigma_{p1-и} &= \begin{cases} K_{п} \cdot (\varepsilon_{p1-и})^n & \varepsilon_{p1-и} \geq \varepsilon_{п}, \\ E_{п} \cdot \varepsilon_{p1-и} & \varepsilon_{p1-и} < \varepsilon_{п}. \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

где ε_{p1} – деформация предварительного растяжения;

$\varepsilon_{и}$ – деформация от изгиба;

$$n = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_{02} \cdot (1 + \varepsilon_{02})}{\sigma_B \cdot (1 + \varepsilon_B)}\right)}{\ln(\varepsilon_{02} / \varepsilon_B)} - \text{константа кривой упрочнения};$$

$K_{п}$ – приведённый модуль упрочнения;

$E_{п}$ – приведённый модуль упругости (модуль Юнга);

$\varepsilon_{п}$ – приведённая пластическая деформация.

Для рассмотрения единой теории изгиба широких и узких заготовок, введено понятие приведенных констант, которые определяются выражениями

$$K_{п} = \begin{cases} K & B/H \leq 5; \\ \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{1+n} \cdot K & B/H > 5; \end{cases}; E_{п} = \begin{cases} E & B/H \leq 5; \\ \frac{4}{3} \cdot E & B/H > 5; \end{cases}; \varepsilon_{п} = \begin{cases} \left(\frac{K}{E}\right)^{\frac{1}{1-n}} & B/H \leq 5; \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \left(\frac{K}{E}\right)^{\frac{1}{1-n}} & B/H > 5 \end{cases}$$

В зоне сечения, расположенной ниже нейтрального слоя

$$\varepsilon_{\text{пас1}} = \frac{\sigma_{\text{p1}}}{E_{\text{п}}};$$

$$\sigma_{\text{p1-и}} = \begin{cases} -K_{\text{п}} \cdot (|\varepsilon_{\text{и}}| - \varepsilon_{\text{пас1}})^n & |\varepsilon_{\text{и}}| \geq \varepsilon_{\text{пас1}} + \varepsilon_{\text{п}}, \\ \sigma_{\text{p1}} + E_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{и}} & |\varepsilon_{\text{и}}| < \varepsilon_{\text{пас1}} + \varepsilon_{\text{п}}. \end{cases} \quad (4)$$

где σ_{p1} – нормальные напряжения в поперечном сечении, возникающие вследствие предварительного растяжения.

$$\sigma_{\text{p1}} = \begin{cases} K_{\text{п}} \cdot (\varepsilon_{\text{p1}})^n & \varepsilon_{\text{p1}} \geq \varepsilon_{\text{п}}, \\ E_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{p1}} & \varepsilon_{\text{p1}} < \varepsilon_{\text{п}}. \end{cases} \quad (5)$$

Процесс «изгиб – растяжение» (И-Р2) характеризуется тем, что заготовка первоначально изгибается по пуансону, а затем в изогнутом состоянии подвергается растяжению. Силы трения между заготовкой и пуансоном, возникающие в процессе растяжения, уменьшают калибрующие деформации и оказывают отрицательное влияние на процесс формообразования, так как увеличивается пружинение детали. Деформации и соответствующие напряжения определяются соотношениями

В зоне сечения, расположенной выше нейтрального слоя

$$\varepsilon_{\text{и-р2}} = \varepsilon_{\text{и}} + \varepsilon_{\text{р2}};$$

$$\sigma_{\text{и-р2}} = \begin{cases} K_{\text{п}} \cdot (\varepsilon_{\text{и-р2}})^n & \varepsilon_{\text{и-р2}} \geq \varepsilon_{\text{п}}, \\ E_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{и-р2}} & \varepsilon_{\text{и-р2}} < \varepsilon_{\text{п}}. \end{cases} \quad (6)$$

где $\varepsilon_{\text{р2}}$ – деформация калибрующего растяжения;

В зоне сечения, расположенной ниже нейтрального слоя

$$\varepsilon_{\text{пас2}} = \frac{|\sigma_{\text{и}}|}{E_{\text{п}}};$$

$$\varepsilon_{\text{акт2}} = |\varepsilon_{\text{р2}} - \varepsilon_{\text{пас2}}|;$$

$$\sigma_{\text{и-р2}} = \begin{cases} \begin{cases} K_{\text{п}} \cdot (\varepsilon_{\text{акт2}})^n & \varepsilon_{\text{акт2}} \geq \varepsilon_{\text{п}}, \\ E_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{акт2}} & \varepsilon_{\text{акт2}} < \varepsilon_{\text{п}}. \end{cases} & |\varepsilon_{\text{и}}| \geq \varepsilon_{\text{п}}, \\ -E_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{акт2}} & \varepsilon_{\text{пас2}} \geq \varepsilon_{\text{р2}}, \\ \begin{cases} K_{\text{п}} \cdot (\varepsilon_{\text{акт2}})^n & \varepsilon_{\text{акт2}} \geq \varepsilon_{\text{п}}, \\ E_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{акт2}} & \varepsilon_{\text{акт2}} < \varepsilon_{\text{п}}. \end{cases} & |\varepsilon_{\text{и}}| < \varepsilon_{\text{п}}. \end{cases} \quad (7)$$

Процесс «растяжение – изгиб – растяжение» (Р1-И-Р2) является сочетанием двух предыдущих процессов. Деформации и соответствующие напряжения определяются соотношениями

В зоне сечения, расположенной выше нейтрального слоя

$$\varepsilon_{\text{р1-и-р2}} = \varepsilon_{\text{р1}} + \varepsilon_{\text{и}} + \varepsilon_{\text{р2}};$$

$$\sigma_{\text{р1-и-р2}} = \begin{cases} K_{\text{п}} \cdot (\varepsilon_{\text{р1-и-р2}})^n & \varepsilon_{\text{р1-и-р2}} \geq \varepsilon_{\text{п}}, \\ E_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{р1-и-р2}} & \varepsilon_{\text{р1-и-р2}} < \varepsilon_{\text{п}}. \end{cases} \quad (8)$$

В зоне сечения, расположенной ниже нейтрального слоя

$$\varepsilon_{\text{пас2}} = \frac{|\sigma_{\text{р1-и}}|}{E_{\text{п}}};$$

$$\varepsilon_{\text{акт2}} = \varepsilon_{\text{р2}} - \varepsilon_{\text{пас2}};$$

$$\sigma_{p1-i-p2} = \begin{cases} \begin{cases} K_{\Pi} \cdot (\varepsilon_{\text{акт}2})^n & \varepsilon_{\text{акт}2} \geq \varepsilon_{\Pi} \\ E_{\Pi} \cdot \varepsilon_{\text{акт}2} & \varepsilon_{\text{акт}2} < \varepsilon_{\Pi} \end{cases} & |\varepsilon_{\text{и}}| \geq \varepsilon_{\text{пас}1} + \varepsilon_{\Pi}; \\ \begin{cases} \sigma_{p1-i} + E_{\Pi} \cdot \varepsilon_{p2} & |\varepsilon_{\text{и}}| \geq \varepsilon_{p2} \\ K_{\Pi} \cdot (\varepsilon_{p1-i-p2})^n & |\varepsilon_{\text{и}}| < \varepsilon_{p2} \end{cases} & |\varepsilon_{\text{и}}| < \varepsilon_{\text{пас}1} + \varepsilon_{\Pi}. \end{cases} \quad (9)$$

Приведены блок-схемы определения положения нейтрального слоя и напряжений для трёх схем нагружения.

Для учёта эффекта Баушингера при определении напряжённо-деформированного состояния при изгибе с растяжением принята гипотеза Г. Мазинга, в которой говорится, что сумма напряжения, с которого производилась разгрузка $\sigma^{(0)}$, и нового предела пропорциональности $\sigma_{\text{T}}^{(1)}$ при реверсивном нагружении является постоянной величиной и равна удвоенному пределу пропорциональности в исходном нагружении

$$\sigma^{(0)} + \sigma_{\text{T}}^{(1)} = S_{\text{T}}^{(1)} = 2\sigma_{\text{T}}^{(0)}. \quad (10)$$

При определении деформаций и напряжений с учётом идеального эффекта Баушингера в математической модели уточнены формулы (4), (7), (9) для выполнения условия (10).

Таким образом, для сложного процесса P1-И-P2 система уравнений (8) имеет вид:

$$\sigma_{p1-i-p2} = \begin{cases} \begin{cases} K_{\Pi} \cdot (\varepsilon_{\text{акт}2} + \Delta\varepsilon_2)^n - \Delta\sigma_2 & \varepsilon_{\text{акт}2} \geq \varepsilon_{\Pi 2} \\ E_{\Pi} \cdot \varepsilon_{\text{акт}2} & \varepsilon_{\text{акт}2} < \varepsilon_{\Pi} \end{cases} & |\sigma_{p1-i}| \geq \sigma S_{02} - \Delta\sigma_2 \\ \begin{cases} K_{\Pi} \cdot (\varepsilon_{\text{акт}2})^n & \varepsilon_{\text{акт}2} \geq \varepsilon_{\Pi} \\ E_{\Pi} \cdot \varepsilon_{\text{акт}2} & \varepsilon_{\text{акт}2} < \varepsilon_{\Pi} \end{cases} & |\sigma_{p1-i}| < \sigma S_{02} - \Delta\sigma \end{cases} \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_2 &= \varepsilon_{\Pi} - \varepsilon_{\Pi 2}; \\ \Delta\sigma_2 &= E_{\Pi} \cdot \Delta\varepsilon_2; \\ \varepsilon_{\Pi 2} &= 2 \frac{\sigma S_{02}}{E_{\Pi}} + \varepsilon_{\text{пас}2}. \end{aligned}$$

При определении $\varepsilon_{\text{пас}2}$ нормальные напряжения, возникающие вследствие изгиба после предварительного растяжения, определяются выражением

$$\sigma_{p1-i} = \begin{cases} -[K_{\Pi} \cdot (\varepsilon_{\text{акт}1} + \Delta\varepsilon_1)^n - \Delta\sigma_1] & |\varepsilon_{\text{и}}| \geq \varepsilon_{\text{пас}1} + \varepsilon_{\Pi 1}, \\ \sigma_{p1} + E_{\Pi} \cdot \varepsilon_{\text{и}} & |\varepsilon_{\text{и}}| < \varepsilon_{\text{пас}1} + \varepsilon_{\Pi 1}. \end{cases} \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_1 &= \varepsilon_{\Pi} - \varepsilon_{\Pi 1}; \\ \Delta\sigma_1 &= E_{\Pi} \cdot \Delta\varepsilon_1; \\ \varepsilon_{\Pi 1} &= 2 \frac{\sigma S_{02}}{E_{\Pi}} - \varepsilon_{\text{пас}1}. \end{aligned}$$

При анализе напряжённо-деформированного состояния заготовки изгибом с растяжением используется гипотеза плоских сечений, согласно которой исходные плоские сечения заготовки в процессе деформирования остаются плоскими.

В разделе 2.2 представлена дискретная модель поперечного сечения заготовки, которая позволяет использовать численное интегрирование по площади

поперечного сечения заготовки при решении задачи определения напряжённо-деформированного состояния заготовки.

В разделе 2.3 приведены формулы расчёта минимальных усилий растяжения, выраженные формулой Эйлера. Процесс деформирования может сопровождаться возникновением сил трения между заготовкой и обтяжным пуансоном, которые препятствуют равномерному распределению деформации калибрующего растяжения по всей длине заготовки.

В разделах 2.4 и 2.5 приведены методики и расчётные формулы по определению остаточных напряжений на этапах изготовления деталей летательных аппаратов – формообразование и последующее удаление части материала. Представлен порядок расчёта остаточных напряжений при разгрузке (по окончании процесса формообразования заготовки на обтяжном прессе). Частичное снятие материала формообразованной заготовки приведет к изменению остаточных напряжений в поперечном сечении заготовки, в результате возникнут неуравновешенные внутренние силы, которые вызовут дальнейшее пружинение детали и переход её в иную стабильную форму.

На рисунке 2 показаны эпюры напряжений в поперечном сечении заготовки после формообразования и последующего удаления части материала для процесса Р1-И.

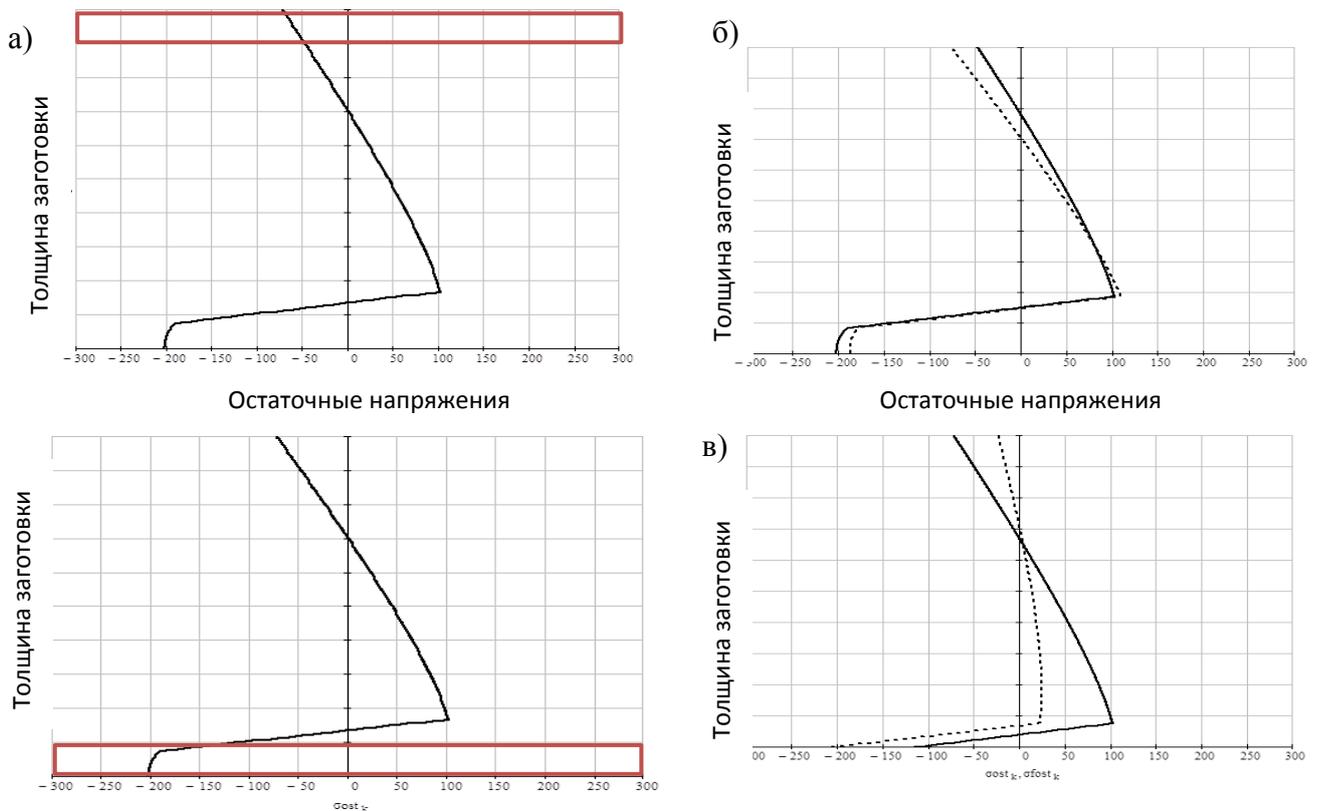


Рисунок 2 – Эпюры напряжений в поперечном сечении заготовки:

а – после формообразования;

б – после удаление материала с наружной поверхности;

в – после удаление материала с внутренней поверхности

— — после формообразования; - - - - - — после удаления части материала

В разделе 2.6 представлен порядок расчёта геометрии детали с учетом пружинения и удаления части материала. По результатам численно-аналитических расчётов принимается решение о выборе схемы нагружения, уровнях деформаций, обеспечивающих наиболее точное изготовление детали.

В третьей главе приведена методика расчёта технологических параметров процесса формообразования деталей летательных аппаратов переменной кривизны методами изгиба с растяжением на обтяжном прессе. Методика основана на математической модели материала, учитывающей эффект Баушингера, параметризацию геометрии пуансона с учётом программы деформирования и особенностей кинематики обтяжного прессы. Приведены алгоритмы решения следующих задач:

- подготовки геометрии расчетного контура;
- задание программы деформирования (схемы нагружения), рисунок 3;
- подготовки расчетных узлов (рисунок 4);
- расчет управляющих параметров прессы с учётом его кинематики (рисунок 4).

Разработаны алгоритмы определения технологических параметров для реализации различных схем нагружения на обтяжном прессе Т-600.

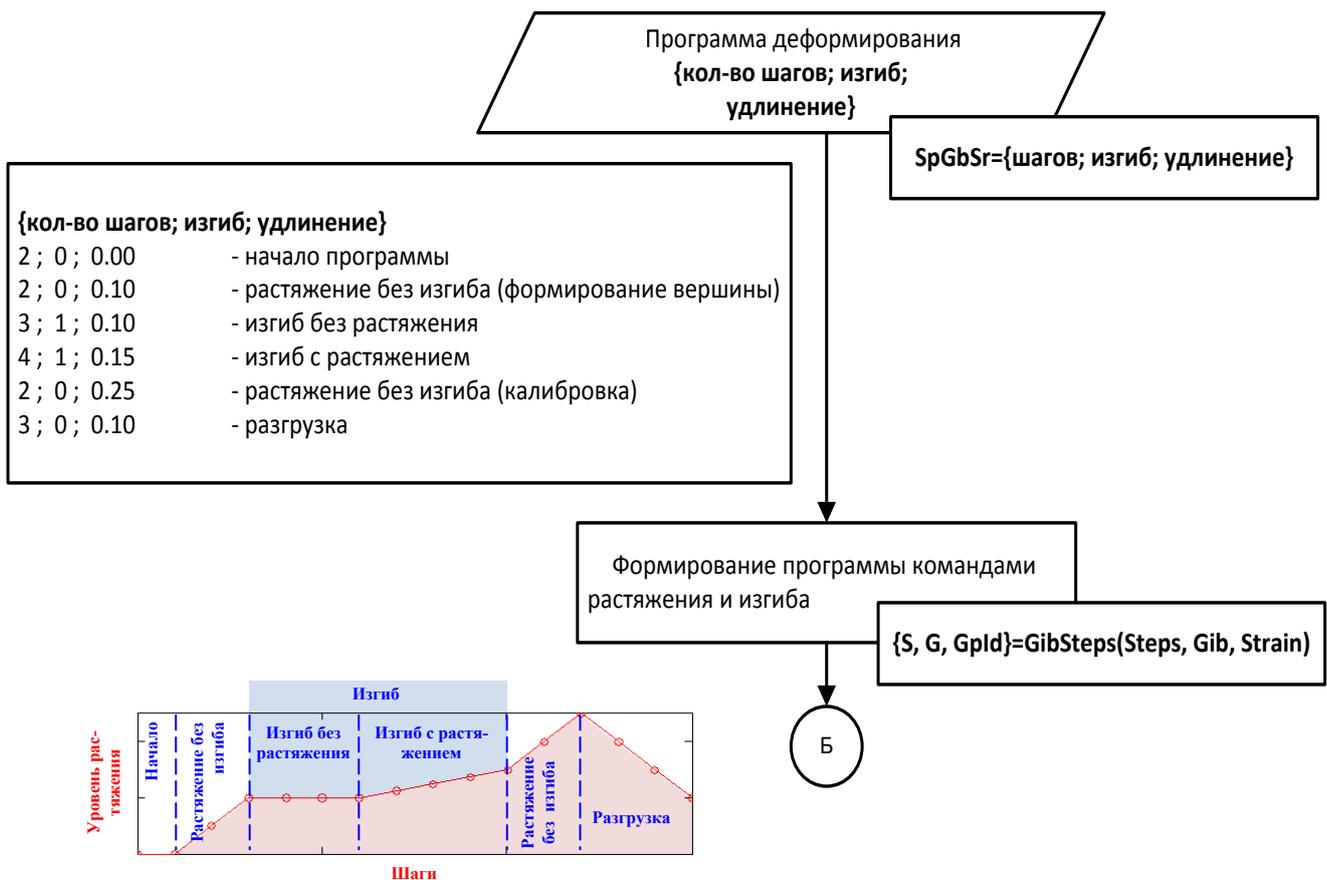


Рисунок 3 – Задание программы деформирования

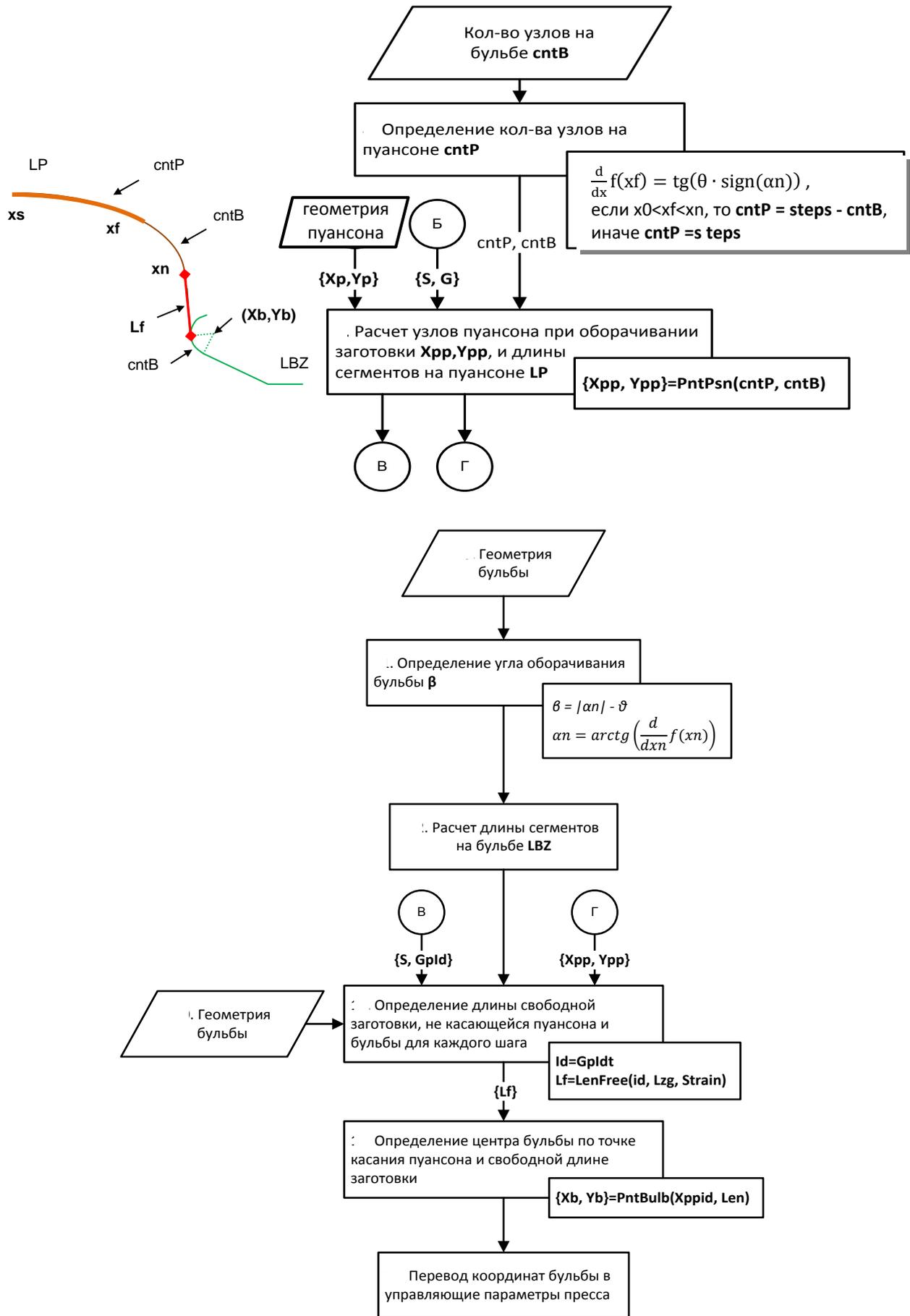


Рисунок 4 – Подготовка расчетных узлов и расчет управляющих параметров пресса

В четвёртой главе приведены расчетно-экспериментальные исследования процессов формообразования деталей летательных аппаратов методами изгиба с растяжением и последующим удалением части материала.

В разделе 4.1 для оценки влияния эффекта Баушингера на величину пружинений проведены численно-аналитические исследования для образцов разной относительной толщины из сплава 1163Т. Формообразование образцов выполнено для трёх схем нагружения при различных комбинациях значений деформаций предварительного и калибрующего растяжений.

Как показали расчёты влияние эффекта Баушингера на пружинение для схемы P1-И незначительно и начинается с относительной толщины $H/R_{дет}$ свыше 0,03. Чем больше значение предварительной деформации, тем большее влияние оказывает эффект Баушингера на изменение кривизны детали (рисунок 5, а). Для схемы И-P2 влияние эффекта Баушингера на пружинение существенно, носит знакопеременный характер и начинается с относительной толщины $H/R_{дет}$ свыше 0,01. При относительной толщине заготовки $H/R_{дет}$ свыше 0,02 кривая с учетом эффекта Баушингера расположена ниже кривой без учета, следовательно, деталь пружинит больше. Увеличение значения калибрующей деформации незначительно влияет на разницу кривых с учетом эффекта Баушингера и без него (рисунок 5, б). Для схемы P1-И-P2 влияние эффекта Баушингера на пружинение более значительно, чем для схемы P1-И, но меньше чем для схемы И-P2.

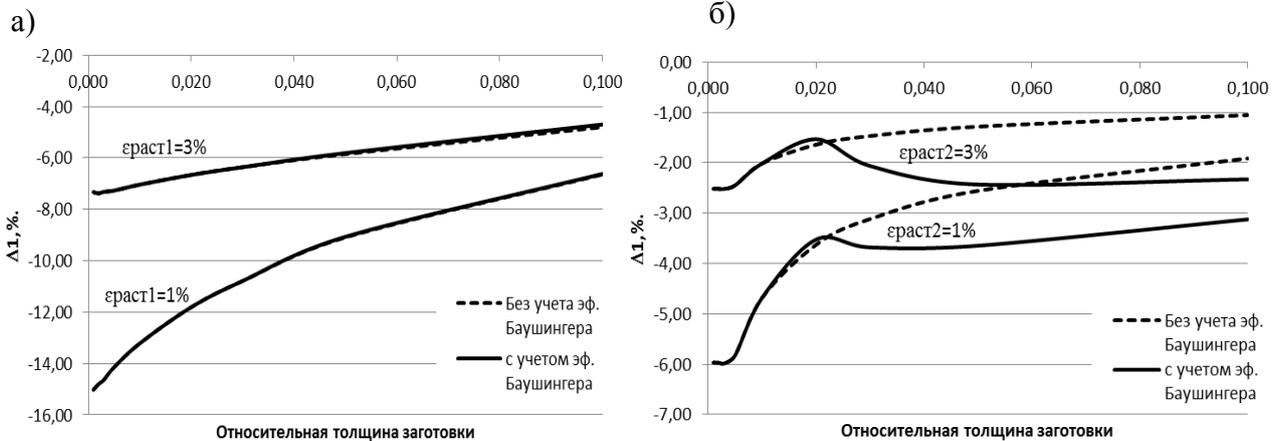


Рисунок 5 – Пружинение образцов при формообразовании:
а – схема нагружения P1-И; б – схема нагружения И-P2

Проведено исследование влияния удаления части материала с образцов после формообразования на величину пружинения заготовок разной относительной толщины. На рисунке 6 ΔH показывает процент удаления материала относительно толщины заготовки.

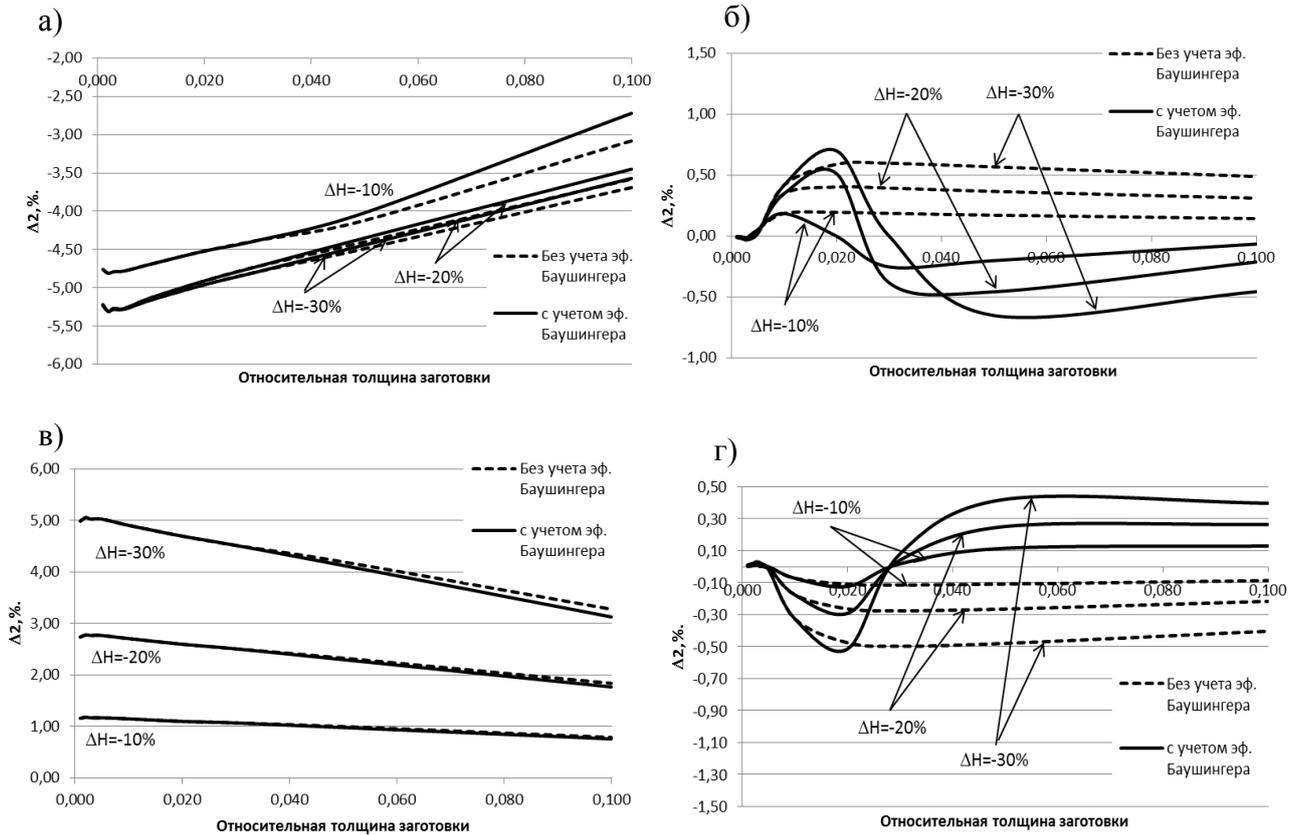


Рисунок 6 – Пружинение образцов после удаления части материала:

- а, б – удаление материала с внутренней поверхности заготовки для схем нагружения P1-I и I-P2 соответственно;
- в, г – удаление материала с наружной поверхности заготовки для схем нагружения P1-I и I-P2 соответственно

Как показал анализ численных расчётов, для схемы P1-I влияние эффекта Баушингера на пружинение после удаления части материала, как с внутренней поверхности формообразованной заготовки, так и с наружной, незначительно. Для схемы I-P2 влияние эффекта Баушингера на изменение кривизны детали после удаления части материала, как с внутренней поверхности формообразованной заготовки, так и с наружной, имеет знакопеременный характер. При снятии материала с внутренней поверхности формообразованной заготовки наблюдается отрицательное пружинение и заготовка стремится повторить форму обтяжного пуансона (рисунок 6, в).

В разделе 4.2 для проверки точности численно-аналитических расчётов проведено конечно-элементное моделирование процесса формообразования заготовок по трём схемам нагружения. Постановка задачи деформирования заготовки методом изгиба с растяжением и её решение методом конечных элементов выполнено с учётом геометрической и физической нелинейности. Геометрическая нелинейность обусловлена изгибом заготовки при деформировании, большими перемещениями, а также смещением точек контакта между пуансоном и поверхностью заготовки при её калибровочном растяжении. Физическая

нелинейность обусловлена нелинейными механическими свойствами материала заготовки.

В разделе 4.3 описаны условия проведения натурального эксперимента и полученные результаты. Натурные эксперименты проведены на обтяжном прессе Т-600 с использованием оснастки для формообразования обшивки детали самолета (рисунок 7, а). В качестве заготовок использованы полосы из листа материала 1163Т шириной 200 мм, длиной 2000 мм и толщиной 3 мм в количестве 9 штук. На всех образцах выполнена разметка (по центру и на краях) для контроля деформаций на каждом этапе процесса формообразования образца (рисунок 7,б).

а)



б)



в)



Рисунок 7 – Натурный эксперимент:
а – обтяжной пуансон; б – разметка на образцах;
в – экспериментальные образцы

На рисунке 8 приведены результаты измерений геометрии образцов, формообразованных по УП, рассчитанным по методике, учитывающей схему нагружения.

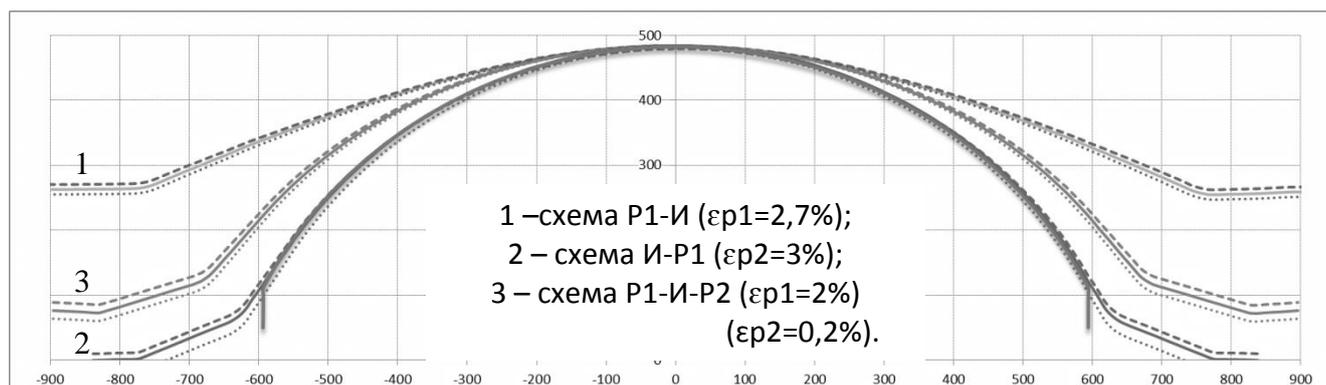


Рисунок 8 – Геометрия образцов

Из рисунка 8 видно, что наименьшее пружинение образцов для данного материала, уровней деформаций и геометрии пуансона наблюдается при формообразовании по схеме И-P2.

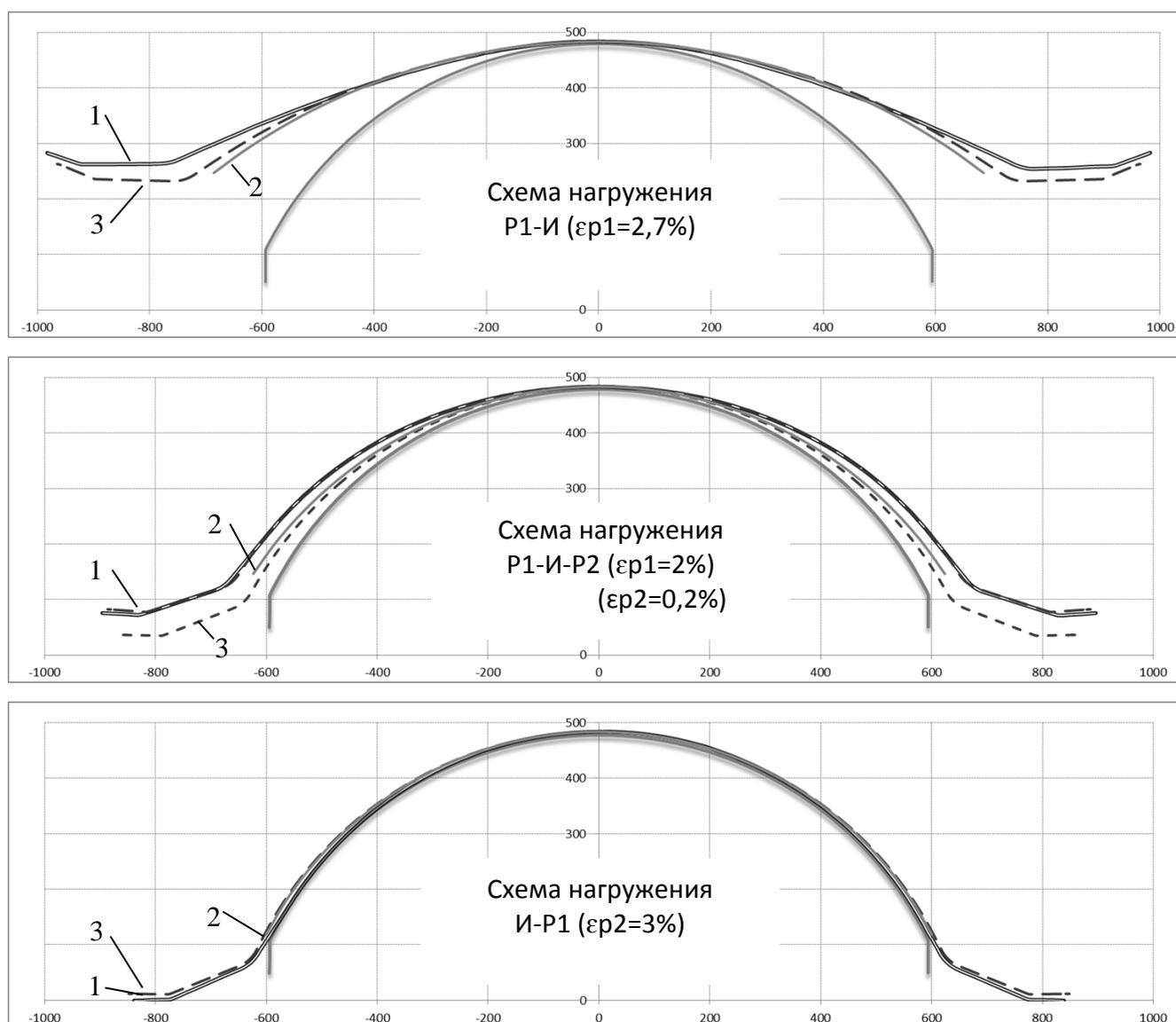


Рисунок 9 – Сравнение экспериментальных данных (1), численно-аналитических расчетов (2) и конечно-элементного моделирования (3)

По значениям реальных деформаций, измеренных на образцах, проведенных численно-аналитический расчёт и конечно-элементное моделирование. Сопоставление расчётных значений геометрии образцов с экспериментальными представлены на рисунке 9.

Отклонения результатов конечно-элементного расчёта и натурального эксперимента можно объяснить:

- погрешностью движения рабочих органов пресса;
- разбросом механических характеристик материала;
- неучётом в КЭ модели анизотропии материала;
- неточностью выбора модели трения и её коэффициентов.

Отклонения результатов численно-аналитического и конечно-элементного расчётов можно объяснить:

- использованием разных моделей трения;
- неучётом в численно-аналитической модели влияния давления слоёв друг на друга.

В приложениях приведены акт выполненных работ с использованием результатов диссертационной работы при выполнении договора НИОКР «Совершенствование методов, технологии и оснастки, разработка управляющих программ для изготовления деталей обтяжкой на прессах с числовым программным управлением» и акт внедрения результатов НИОКР в производство цеха 26 в Филиале ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина». Приведены листинги программ расчёта геометрии детали после формообразования заготовки с учётом эффекта Баушингера и удалением части материала для трёх схем нагружения; листинги подпрограмм расчёта управляющих параметров процесса формообразования детали. Все программы написаны с использованием специального математического пакета MathCad, созданы для проведения численно-аналитических расчётов и натуральных экспериментов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Усовершенствована методика определения напряжённно-деформированного состояния при изгибе с растяжением, позволяющая учитывать последовательность этапов формообразования, а также эффект Баушингера, возникающего при знакопеременном нагружении. Методика включает расчет пружинения заготовки после снятия нагрузки и определение конечной формы детали.

2. Численно-аналитическое исследование влияния схемы нагружения и эффекта Баушингера на конечную форму деталей летательных аппаратов, получаемых методами изгиба с растяжением на обтяжных прессах, показало:

- эффект Баушингера сильнее выражен при схеме нагружения И-Р2 (изгиб – калибрующее растяжение);
- при схеме нагружения Р1-И (предварительное растяжение – изгиб) эффект Баушингера практически не сказывается;

– при анализе процессов изгиба с растяжением на обтяжных прессах для относительных толщин $H/R_{дет} < 0,015$, влияние эффекта Баушингера можно не учитывать.

3. Численно-аналитическое исследование влияния удаления части материала на изменение геометрии деталей летательных аппаратов, получаемых методами изгиба с растяжением на обтяжных прессах, показало:

– при удалении части материала после проведения процесса формообразования по схеме И-Р2 (изгиб – калибрующее растяжение) с внутренней поверхности детали – кривизна увеличивается, с наружной поверхности – уменьшается;

– при удалении части материала после проведения процесса формообразования по схеме Р1-И (предварительное растяжение – изгиб) и Р1-И-Р2 (предварительное растяжение – изгиб – калибрующее растяжение) с внутренней поверхности детали – кривизна уменьшается, с наружной поверхности – увеличивается;

– при анализе влияния удаления части материала на изменение геометрии деталей после изгиба с растяжением на обтяжных прессах для относительных толщин $H/R_{дет} < 0,015$, влияние эффекта Баушингера можно не учитывать.

4. Разработанная методика расчета управляющих параметров для обтяжного пресса Т-600 с числовым программным управлением была использована при выполнении договора НИОКР «Совершенствование методов, технологии и оснастки, разработка управляющих программ для изготовления деталей обтяжкой на прессах с числовым программным управлением», результаты которого внедрены в производство цеха 26 Филиала ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина» г. Комсомольск-на-Амуре (акт 12/16 от 05.12.2016 г.).

5. Проведенные экспериментальные исследования для оценки достоверности результатов математического моделирования показали, что сопоставление результатов численно-аналитических расчётов различных режимов формообразования листовых деталей на обтяжном прессе Т-600 с результатами натуральных экспериментов, показало сходимость расчетных данных с экспериментальными с точностью 96,3%.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. Феоктистов, С.И. Определение геометрических параметров технологического процесса получения деталей летательных аппаратов из прессованных профилей методом изгиба с последующим фрезерованием / С.И. Феоктистов, С.В. Белых, **М.М. Погарцева** // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. 2013. № I-1(13). С.4-11.

2. Белых, С.В. Анализ конструкции и технологии изготовления деталей летательного аппарата из листового материала с использованием программного обеспечения / С.В. Белых, С.И. Феоктистов, А.В. Станкевич, **М.М. Погарцева**, В.В. Мироненко // *Авиационная промышленность*. 2015. № 1. С.55-59.

3. Погарцева, М. М. Методика создания управляющих программ для обтяжных прессов, применяемых в авиационной промышленности / **М.М. Погарцева** // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2017. Том 18, №2. С.404-414.

Публикации включённые в базу цитирования Scopus

4. Pogartseva, M.M. Technique for the development of the technological process for the tightening of aircraft parts on CNC presses / **M.M. Pogartseva**, S.I. Feoktistov // *Materials Science Forum*. – 2019. – Vol. 945. – P. 839-844.]

Публикации в других научных изданиях

5. Белых, С.В. Определение параметров пружинения прессованного профиля в процессе изготовления методами гибки с последующим фрезерованием / С.В. Белых, **М.М. Погарцева** // *Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 42-й научной конференции аспирантов и студентов, Комсомольск-на-Амуре, 2012 г. : в 4 ч. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2012. Ч.3. С.221-222.*

6. Погарцева, М. М. Определение геометрических параметров технологического процесса получения деталей летательных аппаратов из прессованных профилей методом изгиба с последующим фрезерованием / **М.М. Погарцева** // *Молодые ученые – Хабаровскому краю: материалы XV Краевого конкурса молодых ученых и аспирантов, Хабаровск, 17–24 янв. 2013 г. : в 2 т. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. Т.2. С.193-198.*

7. Феоктистов, С.И. Учет влияния фрезерования на форму деталей летательных аппаратов из прессованных профилей, получаемых методами изгиба / С.И. Феоктистов, С.В. Белых, **М.М. Погарцева** // *Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей III Всерос. науч.-практ. конф., Иркутск, 11-12 апреля, 2013 г. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. С.36-44.*

8. Погарцева, М. М. Определение формы заготовки с учетом упругого восстановления материала после формообразования и удаления материала в процессе последующего фрезерования / **М.М. Погарцева** // *Молодежь. Проекты. Идеи: сб. статей третьей науч.-практ. конф., Иркутск, 9-11 октября, 2013 г. – Иркутск: Изд-во ИАЗ «Иркут», 2014. С.72-76.*

9. Феоктистов, С.И. Определение величины пружинения листовой заготовки при изгибе с растяжением и последующем фрезеровании / С.И. Феоктистов, **М.М. Погарцева** // *Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 44-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 01-12 апреля 2014 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014. С.523-526.*

10. Белых, С.В. Методика оптимизации управляющих программ обтяжного пресса типа FET / С.В. Белых, **М.М. Погарцева** // *Авиамашиностроение и*

транспорт Сибири: сб. статей IV Всерос. науч.-практ. конф., Иркутск, 11-12 апреля, 2014 г. – Иркутск, 10-11 апреля, 2014 г. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2014. С.15-20.

11. Погарцева, М. М. Определение величины пружинения листовой заготовки при изгибе с растяжением и последующем фрезеровании / **М.М. Погарцева** // Молодые ученые – Хабаровскому краю : материалы XVI Краевого конкурса молодых ученых и аспирантов, Хабаровск, 17–24 января 2014 г. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2014. С.341-346.

12. Феоктистов, С.И. Определение формы технологической оснастки для изготовления деталей летательных аппаратов из прессованных профилей / С.И. Феоктистов, **М.М. Погарцева** // Наука молодых – основа будущего России: материалы докладов конкурса научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых «Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2014 г.) – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2014. С 98-104.

13. Погарцева, М. М. Методика оптимизации процесса формообразования деталей сложной геометрии из листа методом продольной обтяжки на оборудовании, оснащённом ЧПУ / **М.М. Погарцева** // Наука молодых – основа будущего России: материалы докладов конкурса научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых «Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2014 г.). – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2014. С.28-33.

14. Погарцева, М. М. Методика оптимизации процесса формообразования деталей сложной геометрии из листа методом продольной обтяжки на оборудовании, оснащённом ЧПУ / **М.М. Погарцева** // Фундаментальные исследования в области создания инновационных технологий и новых материалов, направленных на развитие авиационных и космических комплексов. Достижения фундаментальной науки и образования – в инновационные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. и Междунар. молодёжной школы-семинара, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 мая 2015 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. С.132-134.

15. Феоктистов, С.И. Разработка математической модели станка для продольной обтяжки FEL 2x500 / С.И. Феоктистов, **М.М. Погарцева** // Фундаментальные исследования в области создания инновационных технологий и новых материалов, направленных на развитие авиационных и космических комплексов. Достижения фундаментальной науки и образования – в инновационные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. и Междунар. молодёжной школы-семинара, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 мая 2015 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. С.135-136.

16. Феоктистов, С.И. Методика оптимизации процесса формообразования деталей сложной геометрии из листа методом продольной обтяжки на оборудовании, оснащённом ЧПУ / С.И. Феоктистов, **М.М. Погарцева** // Молодежь XXI века : III и IV научно-практич. конф. : сборник трудов. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2015. С.393-396.

Подписано в печать 12.03.2020.
Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$. Бумага 80 г/м^2 . Ризограф EZ570E.
Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ _____

Полиграфическая лаборатория
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.