

На правах рукописи



Чжо Заяр Со

**РАСЧЁТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИАГРАММ
ПРЕДЕЛЬНОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ**

Специальность 05.07.02

Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2019

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
летательных аппаратов» ФГБОУ ВО
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)» (г. Москва)

Кривенок Антон Александрович,
кандидат технических наук, ведущий инженер
научно-производственного бюро управления
технического развития филиала ПАО
«Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А.
Гагарина» (г. Комсомольск-на-Амуре)

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

Защита состоится «19» декабря 2019 г. в 13:00 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 « » октября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.092.06

кандидат физико-математических наук

Д.А. Потянихин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Летательный аппарат состоит из десятков тысяч различных металлических деталей (первичных элементов конструкции), значительную часть которых получают методами листовой штамповкой. В настоящее время перед авиастроением стоит задача повышения эффективности производства и качества изготавливаемых деталей.

Несмотря на многочисленные исследования процессов листовой штамповки и большой опыт промышленного применения, разработать оптимальный вариант технологического процесса применительно к изготовлению конкретной детали представляет и в наше время достаточно сложную задачу. Это приводит к большим объемам экспериментальных и доводочных работ на стадии технологической подготовки производства.

Наиболее значимым дефектом в процессах пластического деформирования является разрушение заготовки, но для получения качественных деталей важное значение приобретают методы расчета (прогнозирования) предельных деформаций, превышение которых ведет также к появлению того или иного дефекта в деформируемой заготовке (трещин, гофров, складок, поверхностей с «апельсиновой» коркой, локального утонения, неравномерного утонения заготовки т.п.). Поэтому, одной из важнейших задач при разработке технологических процессов листовой штамповки является прогнозирование дефектов, возникающих при деформировании.

Для анализа предельных деформаций материала при листовой штамповке в конечно-элементных коммерческих пакетах PAM-Stamp, AutoForm и др., широко применяются диаграммы предельного формоизменения (Forming Limit Diagram – FLD), которые устанавливают связь между компонентами главных деформаций в момент разрушения. Анализ деформированного состояния на основе FLD-диаграмм позволяет также прогнозировать различные дефекты, возникающие в процессе листовой штамповки. Однако, в настоящее время при использовании численно-аналитических методов расчета эти возможности FLD-диаграмм используются очень ограничено.

Поэтому задача совершенствования численно-аналитических методов расчета предельных технологических возможностей с применением FLD-диаграмм, а также прогнозирования различных дефектов, возникающих в процессе изготовления тонкостенных деталей летательных аппаратов является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. В инженерной практике при решении задач листовой штамповки широко используются методы разработанные М.Н. Горбуновым, В.И. Ершовым, Е.И. Исаченковым, В.Ф. Катковым, А.Д. Матвеевым, О.В. Поповым, М.В. Сторожевым, А.Д. Томленовым, А.С. Чумадиным и другими исследователями. Наряду с приближенными аналитическими методами определения напряженно-деформированного состояния в теории пластичности большое распространение получили такие методы, в которых упруго-пластическая задача сводится к

последовательности решения упругих задач в результате применения процесса последовательных приближений. Наиболее известным является метод упругих решений, который был предложен А.А.Ильюшиным и получил развитие и теоретическое обоснование в работах Н.И. Безухова, И.А. Биргера и др. Другим эффективным приближенным методом для решения упруго-пластических задач является разработанный И.А.Биргером метод переменных параметров упругости (МППУ), который получил дальнейшее развитие в работах С.И. Феоктистова.

Совершенствованию методов расчета предельных деформаций и построению FLD-диаграмм с использованием различных критериев предельного деформирования посвящены работы российских и зарубежных ученых, в том числе В.Д. Головлева, Г.Д. Деля, Г. Закса, С. Килера, К. Кужинского, Д. Лубана, З. Марчиняка, А.Д. Матвеева, Г. Свифта, А.Д. Томленова, Р. Хилла, А.С. Чумадина и других. В настоящее время FLD-диаграммы являются одним из наиболее точных инструментов прогнозирования дефектов в материале в процессе его деформирования. Однако не изученными остаются вопросы – какие критерии предельного деформирования позволяют наиболее точно определить момент разрушения заготовки при проведении конкретного технологического процесса.

Целью диссертационной работы является разработка рациональных методик расчёта предельных технологических возможностей, прогнозирования дефектов и повышение точности анализа при моделировании процессов изготовления тонкостенных деталей летательных аппаратов.

Задачи исследования:

1 Проведение теоретических исследований процессов листовой штамповки и разработка методики определения напряженно-деформированного состояния на основе метода переменных параметров упругости.

2 Разработка усовершенствованной модели упрочнения материала, учитывающей механические свойства металла, а также свойства кривой упрочнения.

3 Разработка усовершенствованных математических моделей расчета предельных деформаций, основанных на энергетических и геометрических (кинематических) критериях с учетом реальных механических характеристик материала, позволяющих значительно упростить использование FLD-диаграмм для расчета предельных технологических возможностей процессов листовой штамповки.

4 Создание новых методик расчета параметров получаемых деталей при предельном деформировании листовых заготовок в процессе изготовления тонкостенных деталей летательных аппаратов.

5 Проведение расчетов предельных технологических возможностей процессов листовой штамповки с использованием различных критериев определения предельных деформаций, а также оценка сходимости теоретических положений с экспериментальными данными, подтверждающими эффективность разработанных теоретических моделей.

Научная новизна:

1 Разработана усовершенствованная методика определения напряженно-деформированного состояния и основных технологических параметров при изготовлении тонкостенных деталей летательных аппаратов вытяжкой, а также раздачей и обжимом с учётом физической и геометрической нелинейности.

2 Разработана усовершенствованная математическая модель упрочнения материала, учитывающая механические свойства металла, а также свойства кривой упрочнения.

3 Получены математические выражения, позволяющие аналитически построить кривые предельного деформирования на основе энергетических и геометрических (кинематических) критериев с учетом реальных механических характеристик материала, что позволяет значительно упростить использование FLD-диаграмм для определения предельных технологических возможностей процессов листовой штамповки при использовании численно-аналитических методов расчета.

4 Разработана усовершенствованная методика расчёта предельных технологических возможностей и прогнозирования дефектов процессов изготовления тонкостенных деталей летательных аппаратов.

Теоретическая значимость диссертации заключается в дальнейшем развитии методов определения напряженно-деформированного состояния и основных технологических параметров процессов листовой штамповки, а также в дальнейшем развитии теории предельного деформирования листовых заготовок.

Практическая значимость заключается в совершенствовании методов расчёта предельных технологических возможностей и прогнозирования дефектов процессов изготовления тонкостенных деталей летательных аппаратов, что повышает качество разработки технологического процесса и, в конечном итоге, качество получаемой детали.

Методология и методы исследования. Теоретический анализ процессов листовой штамповки осуществлялся с использованием основных положений теории пластичности. Вычислительные процессы построены на численных методах интегрирования дифференциальных уравнений и базовых принципах программирования. Все программы, созданные для проведения численной апробации разработанных методик, написаны с использованием специального математического пакета MathCAD.

Положения, выносимые на защиту:

1 Методика определения напряженно-деформированного состояния и основных технологических параметров при изготовлении тонкостенных деталей летательных аппаратов вытяжкой, а также раздачей и обжимом.

2 Математическая модель упрочнения материала, учитывающая механические свойства металла, а также свойства кривой упрочнения.

3 Математические выражения, позволяющие аналитически построить кривые предельного деформирования на основе энергетических и

геометрических (кинематических) критериев с учетом реальных механических характеристик материала.

4 Методика расчёта предельных технологических возможностей и прогнозирования дефектов процессов изготовления тонкостенных деталей летательных аппаратов.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием фундаментальных принципов теории обработки металлов давлением, обоснованностью принятых допущений, корректными математическими методами исследования решаемых задач, а также вычислительными экспериментами и удовлетворительным совпадением теоретических расчетов с опубликованными ранее экспериментальными результатами.

Апробация результатов диссертации. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

1 47-я научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Научно-техническое творчество аспирантов и студентов» (г. Комсомольск-на-Амуре, 10-21 апреля 2017 г.).

2 Всероссийская национальная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (г. Комсомольск-на-Амуре, 09-20 апреля 2018 г.)

3 VII- я научно-практическая конференция с международным участием «Молодежь XXI век». (г. Арсеньев, 13 апреля 2018 г.).

4 Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «Far East Con-2018». (г. Владивосток, 2 - 4 октября 2018 г.).

5 V научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Исследования и перспективные разработки в машиностроении». (г. Комсомольск-на-Амуре, сентябрь 2018 г.).

6 Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг». (г. Сочи, 25-29 марта 2019 г.).

7 II Всероссийская национальная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований». (г. Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2019 г.).

8 International Conference on Nanomaterials, Materials and Manufacturing Engineering «ICNMM -2019». (г. Бангкок, 16-19 мая 2019 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 работ, в том числе две статьи из перечня изданий, определенных ВАК РФ, две статьи включены в базы цитирования Scopus.

Личный вклад соискателя. Автор, совместно с научным руководителем, участвовал в постановке задач исследования, формулировке положений и выводов, выносимых на защиту, и написании статей по теме исследования. Автор лично участвовал в разработке математических моделей для решения

поставленных задач, составил алгоритмы и программы расчетов, выполнил, обработал и проанализировал все необходимые расчеты.

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

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

- **другие методы и средства разработки и осуществления технологических процессов производства.**

П.12. Технологические процессы, специальное оборудование для изготовления деталей летательных аппаратов, включая технологию:

- **изготовления деталей обработкой давлением (ковка, штамповка и др.).**

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех основных глав, общих выводов, списка литературы и материалов приложений. Работа изложена на 141 страницах машинописного текста, содержит 106 рисунков, 1 таблицу, список литературы из 106 наименований и 11 приложений на 64 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень разработанности темы исследования, определены цели и основные задачи работы, отражена научная новизна и практическая значимость. Кратко представлено содержание диссертации по главам.

В первой главе дан конструкторско-технологический анализ объекта производства (летательного аппарата), проанализированы существующие способы изготовления тонкостенных деталей методами листовой штамповки и дефекты, возникающие в процессе изготовления этих деталей.

Анализ литературных источников свидетельствует, что исследованию формообразующих операций листовой штамповки посвящено большое количество работ российских и зарубежных ученых и специалистов.

Наиболее изученными являются традиционные процессы листовой штамповки: раздача и обжим труб, формовка, вытяжка, отбортовка и гибка листового материала.

Анализ методов расчета напряженно-деформированного состояния этих процессов показал, что расчеты осуществляют, как правило, упрощенным «инженерным» методом, методом баланса работ, методом линий скольжения и вариационными методами расчета. Для повышения точности определения напряженно-деформированного состояния было предложено использовать метод переменных параметров упругости.

Развитие методов расчета предельных деформаций, ограничиваемых разрушением заготовки под действием растягивающих напряжений, происходит в двух направлениях:

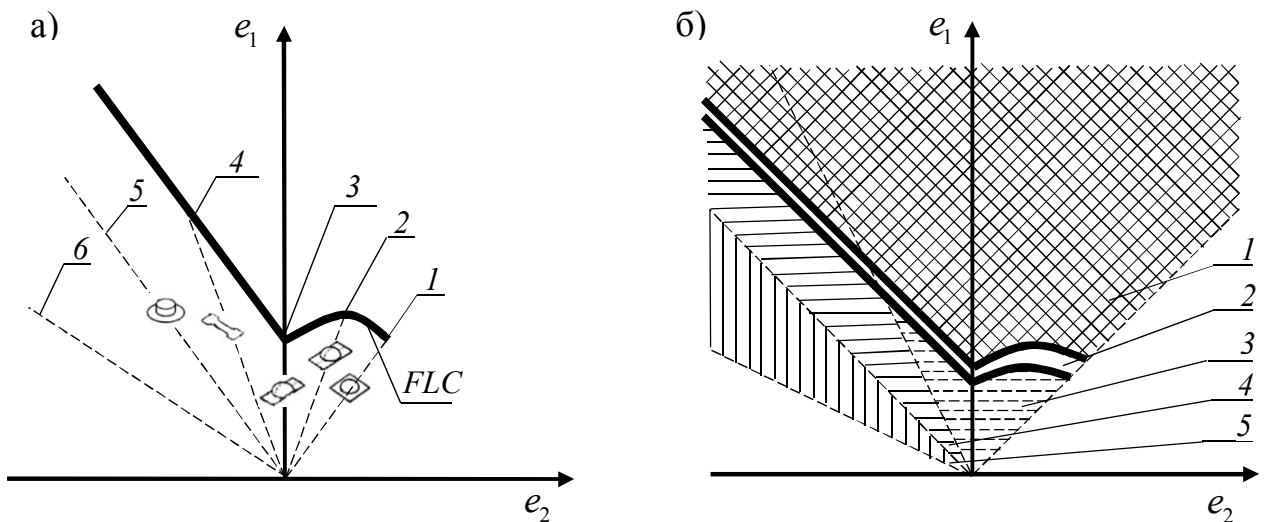
- в направлении изучения и описания физического механизма разрушения материала на уровне взаимодействия дислокаций (на микроуровне);
- в направлении изучения и описания механизма предельного деформирования на уровне полномасштабного образца материала (на макроуровне).

Первое направление относится к физике пластической деформации и задачам теории разрушения, второе – к механике пластической деформации и задачам предельного деформирования.

В механике пластической деформации известны теоретические, теоретико-эмпирические и эмпирические подходы к расчету (прогнозированию) предельных деформаций в операциях листовой штамповки.

Эмпирические методы основаны на механических испытаниях образцов на одноосное растяжение. Их недостатком является ограниченная область использования полученных результатов.

Теоретико-эмпирические методы основаны на использовании и распространении результатов испытаний образцов на одноосное растяжение на другие схемы деформирования заготовок. Их недостаток – невозможность решения большого круга задач, если отсутствуют необходимые экспериментальные данные.



- 1-равномерно-двухосное растяжение;
- 2-двухосное растяжение;
- 3- плоское деформации;
- 4- одноосное растяжение;
- 5-вытяжка: 6- осадка

- 1-зона разрушений;
- 2- опасность возникновения разрывов;
- 3- зона безопасного формоизменения;
- 4- опасность возникновения складок,
- 5- образование складок

Рисунок 1 – Схема диаграммы предельного формоизменения (FLD)
 FLC (Forming Limit Curve) – кривая предельного формоизменения

Теоретические методы основаны на использовании критериев предельного деформирования. При определении предельных технологических возможностей технологических процессов изготовления тонкостенных деталей в данной работе рассматриваются теоретические методы расчета (прогнозирования) предельного деформирования, основы которых заложены в работах Г. Закса, Д. Лубана, Р. Хилла, А.Д. Томленова, В.Д. Головлева, Г.Д. Деся, З. Марчиняка, А.Д. Матвеева, А.С. Чумадина и др.

В результате многих исследований, которые были проведены для оценки формоизменения листовых заготовок, С. Килер (S. Keeler) разработал концепцию диаграммы предельного формоизменения (Forming Limit Diagram – FLD) или FLD-диаграммы, которая стала общепринятым подходом в листовой штамповке для оценки предельного деформирования листовых металлов, включая алюминиевые и титановые листы.

Схема диаграммы предельного формоизменения (FLD-диаграммы) и связь характерных областей диаграммы с различными схемами нагружения тонкостенной заготовки представлена на рисунке 1 а).

Различные зоны FLD-диаграммы, определяющие возникновения тех или иных дефектов, показаны на рисунке 1 б).

Рассмотрены теоретические методы расчета предельного формоизменения тонкостенных полуфабрикатов. Как показал анализ литературных источников в этом направлении, используются различные подходы для расчета (прогнозирования) предельных деформаций: теоретический, теоретико-эмпирический и эмпирический. В теоретическом плане наибольшее распространение получили методы расчета предельных деформаций, основанные на энергетических и кинематических (геометрических) критериях предельного деформирования.

Проведенные исследования показали, что методы расчета предельных деформаций, превышение которых приводит к разрушению заготовки, еще далеки от совершенства. Это в конечном итоге ограничивает возможности использования диаграмм предельного деформирования при численно-аналитических методах расчёта предельных технологических возможностей процессов изготовления тонкостенных деталей летательных аппаратов.

Проведенный в первой главе анализ способов изготовления тонкостенных деталей методами листовой штамповки, методов определения напряжённо-деформированного состояния и методов расчета предельного формоизменения позволил сформулировать цель и задачи исследования.

Во второй главе в разделе 2.1 на основе метода переменных параметров упругости построены математические модели технологических процессов штамповки тонкостенных деталей, таких как: вытяжка, обжим, раздача.

При решении задачи о напряженно-деформированном состоянии в процессе вытяжки, используя физические соотношения деформационной теории пластичности и уравнение совместности истинных деформаций, записанное в координатах Эйлера

$$\frac{de_\varphi}{d\rho} = \frac{1 - \exp(e_\varphi - e_\rho)}{\rho},$$

получим нормальное интегральное уравнение в напряжениях, определяющее напряженное состояние фланца при осесимметричной вытяжке:

$$\begin{aligned} \sigma_\varphi = & \frac{1}{2}\sigma_\rho - \frac{2}{3}E_{сек} \ln \left\{ \frac{1}{\rho\sqrt{\rho}} \int_R^\rho \frac{3}{2}\sqrt{\rho} \exp\left(-\frac{3}{4E_{сек}}\sigma_\rho\right) d\rho + \right. \\ & \left. + \frac{R\sqrt{R}}{\rho\sqrt{\rho}} \exp\left[-\frac{3}{2E_{сек}}\left(\sigma_{\varphi R} - \frac{1}{2}\sigma_{\rho R}\right)\right] \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь и в дальнейшем индекс R указывает, что рассматривается значение параметра при $\rho = R$, что соответствует внешнему краю фланца в процессе деформирования.

Процесс вытяжки рекомендуется решать в напряжениях. Решение проводится методом последовательных приближений по рекуррентной схеме с использованием уравнения равновесия и уравнения (1):

$$\sigma_\rho^{(k+1)} = \left(\int_R^\rho \frac{(\sigma_\varphi^{(k)} - \sigma_\rho^{(k)})S(\rho)^{(k)}}{\rho} d\rho + S(R)^{(k)}\sigma_{\rho R} \right) / S(\rho)^{(k)}.$$

где величины со знаком (k) и $(k+1)$ обозначают соответственно их значения в k -м и $(k+1)$ -м приближениях.

Граничные условия при вытяжке, с учетом трения на фланце, имеют вид:

$$\text{при } \rho = R, \sigma_\rho = \sigma_{\rho R} = \frac{\mu_{мп1} [R_0^2 - (r_0 + r_m)^2] q}{R \cdot S(R)}; \text{ при } \rho = R, \sigma_\varphi = \sigma_{\varphi R} = \ln(R / R_0).$$

где $\mu_{мп1}$ - коэффициент трения на фланце; q - давление прижима.

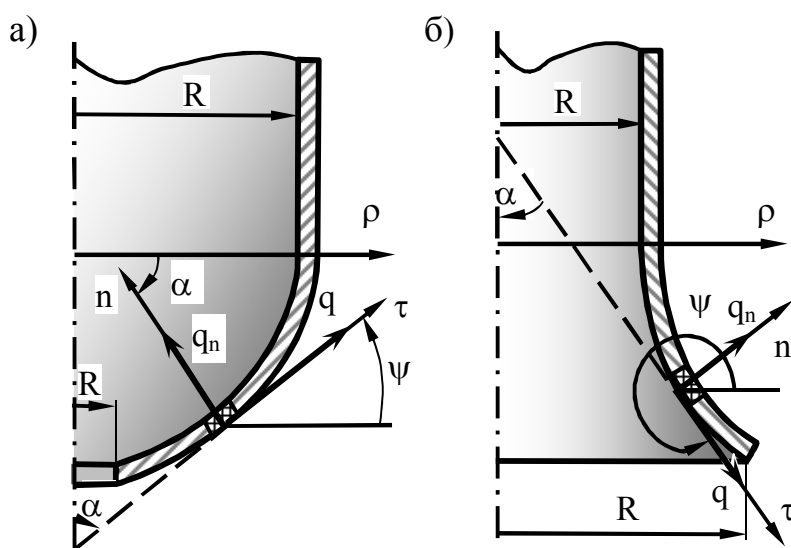


Рисунок 2 – Схема деформирования трубчатой заготовки:
а – обжим; б – раздача

После определения напряжений, определяют деформации, используя физические соотношения деформационной теории пластичности.

Для контроля сходимости процесса проводят сравнение значений секущих модулей:

$$E_{сек}^{(k+1)} - E_{сек}^{(k)} \leq \Delta.$$

После достижения заданной точности, уточняют значение напряжений на ребре матрицы с учётом изгиба, трения и спрямления по известным формулам.

Тангенциальные напряжения в районе ребра матрицы изменяются от некоторого текущего значения до нуля, так как в месте схода заготовки с ребра матрицы напряженное состояние близко к линейному растяжению.

В случае формоизменения трубчатой заготовки (рисунок 2), учитывая, что при обжиме и вывороте внутрь $q_n = q(\rho)$, $q_\tau = \mu_{TP}q(\rho)$, $\psi = 90^\circ - \alpha$, а при раздаче и вывороте наружу $q_n = q(\rho)$, $q_\tau = -\mu_{TP}q(\rho)$, $\psi = 270^\circ - \alpha$, можно получить уравнение равновесия в виде:

$$\frac{d}{d\rho}[\sigma_\rho S(\rho)] = \frac{\sigma_\varphi (1 + \mu_{TP} \operatorname{ctg} \alpha) - \sigma_\rho \left(1 + \mu_{TP} \rho \frac{d\alpha}{d\rho}\right)}{\rho} S(\rho). \quad (2)$$

Это уравнение справедливо для всех перечисленных процессов формоизменения трубчатой заготовки.

Подставляя в уравнение (2) уравнения связи напряжений и деформаций в соответствии с гипотезами деформационной теории, а также рассматривая полученное соотношение как линейное дифференциальное уравнение первого порядка, получим интегральное уравнение равновесия в деформациях:

$$e_\rho = -\frac{1}{2} \cdot e_\varphi + \frac{3}{4} \cdot \frac{U(\rho)}{S(\rho) \cdot E_{сек}} \cdot \int_R^\rho \frac{S(\rho) E_{сек} e_\varphi (1 + \mu_{TP} \cdot \operatorname{ctg} \alpha)}{\rho \cdot U(\rho)} d\rho + \frac{E_{сек R} \cdot S(R)}{E_{сек} \cdot S(\rho)} \cdot \left(e_{\rho R} + \frac{1}{2} e_{\varphi R}\right) \cdot U(\rho), \quad (3)$$

где

$$U(\rho) = \exp \left[-\int_R^\rho \frac{1 - \mu_{TP} \cdot \operatorname{ctg} \alpha + 2\mu_{TP} \rho \frac{d\alpha}{d\rho}}{2\rho} d\rho \right]. \quad (4)$$

При анализе формоизменения трубчатой заготовки можно считать тангенциальные деформации известными:

$$e_\varphi = \ln \frac{\rho}{R_0}, \quad (5)$$

где R_0 – радиус заготовки (трубы).

Для определения граничных условий необходимо учесть, что

$$E_{сек R} \cdot \left(e_{\rho R} + \frac{1}{2} e_{\varphi R}\right) = \frac{3}{4} \sigma_{\rho R}.$$

В случае раздачи без подпора ($\sigma_{\rho R} = 0$) последнее слагаемое в уравнении (3) обращается в нуль.

При рассмотрении раздачи в конической матрице, угол α равен углу конусности α_k . Тогда уравнение (4) упрощается

$$U(\rho) = \exp\left[\frac{1 - \mu_{TP} \cdot \operatorname{ctg} \alpha_k}{2} \ln \frac{R}{\rho}\right]. \quad (6)$$

В разделе 2.2 изложена новая методика аппроксимации кривой упрочнения, позволяющая с большой точностью описать эту кривую аналитически, используя типовые справочные характеристики материалов и общие свойства кривой упрочнения для истинных напряжений.

При решении задач обработки металлов давлением, для определения механических свойств металла используются кривые деформационного упрочнения.

Рассмотрим степенную аппроксимацию кривой деформационного упрочнения 3-го рода, определяющей зависимость напряжений сопротивления деформированию σ_s от интенсивности логарифмических деформаций e_i :

$$\sigma_s = A e_i^n, \quad (7)$$

где n, A – параметры степенной аппроксимации.

Параметры n, A обычно выражаются через основные механические характеристики материала или определяются по экспериментальной кривой деформирования, полученной при испытании образцов на разрыв.

Для степенной аппроксимации возможно несколько условий проведения аппроксимирующей функции.

Например, учитывая, что для изотропного несжимаемого материала диаграмма $\sigma_i = f(e_i)$ совпадает с диаграммой одноосного растяжения, эти параметры можно выбрать из условия прохождения кривой $\sigma_i = A e_i^n$ через точку условного предела текучести $(e_{0,2}, \sigma_{s0,2})$ и точку, соответствующую временному сопротивлению деформирования (e_u, σ_{SB}) для истинных напряжений.

В этом случае A_1 и n_1 , определяются выражениями:

$$A_1 = \sigma_{SB} / e_u^{n_1}, \quad n_1 = \ln(\sigma_{SB} / \sigma_{s0,2}) / \ln(e_u / e_{0,2}), \quad (8)$$

где $\sigma_{SB} = \sigma_B \cdot \exp(e_B)$ – истинное временное сопротивление деформированию; $\sigma_{s0,2} = \sigma_B \cdot \exp(e_{0,2})$ – истинные напряжения, соответствующие условному пределу текучести; e_u – деформация, соответствующая временному сопротивлению деформирования или началу образования шейки; $e_{0,2} = \sigma_{0,2} / E + 0,002$ – деформация, соответствующая условному пределу текучести.

Другой метод определения A и n основывается на использовании свойства кривых упрочнения 3-го рода.

Учитывая свойство кривой упрочнения 3-го рода

$$\frac{d\sigma_{SB}}{de_{u}} = \sigma_{SB} = \operatorname{tg} \alpha ,$$

можно определить A_2 и n_2 :

$$A_2 = (\sigma_{SB} / e_{u}^{n_2}); n_2 = e_{u}. \quad (9)$$

Подставляя полученные выражения в уравнение (7), получаем уравнение Холломоны:

$$\sigma_s = \sigma_{SB} \cdot (e / e_{u})^{e_{u}},$$

И в первом и во втором случае используется значение деформации, соответствующее началу образования шейки e_{u} , которую необходимо определять экспериментально.

Таким образом, основное затруднение возникает при определении e_{u} – истинной деформации, соответствующей началу образования шейки. Поэтому предлагается при аппроксимации диаграммы деформирования определять величину e_{u} расчетным путем, положив в основу при определении параметров аппроксимации справочные характеристики E , $\sigma_{0,2}$, σ_B .

Анализируя выражения (8) и (9) можно заметить, что формулы для определения A совпадают, а для определения n различаются. Чтобы кривые проходили через две характерные точки и одновременно удовлетворяли свойствам кривой деформационного упрочнения 3-го рода, необходимо выполнения условия:

$$n = e_{u} = \frac{\ln \sigma_{SB} - \ln \sigma_{s0,2}}{\ln e_{u} - \ln e_{0,2}}. \quad (10)$$

Это условие выполняется в случае, если:

$$e_{u} - \frac{\ln \sigma_{SB} - \ln \sigma_{s0,2}}{\ln e_{u} - \ln e_{0,2}} = 0. \quad (11)$$

Численное решение этого уравнения позволяет определить e_{u} , и следовательно n .

В разделе 2.3 проведено уточнение существующих математических моделей предельного деформирования и получены новые математические выражения, позволяющие значительно упростить использование FLD-диаграмм для численно-аналитических методов расчета предельных технологических возможностей процессов листовой штамповки.

При построении FLD-диаграмм в качестве критерия предельного деформирования при теоретическом прогнозе используются в основном энергетические и геометрические критерии.

Энергетические критерии. Для определения предельного формоизменения листового металла Свифт (Swift) предложил критерий образования рассеянной шейки, который предполагает, что момент образования

рассеянной шейки совпадает с моментом достижения максимума нагрузки в обоих основных направлениях.

Преобразуя выражения, полученные в работах Свифта, определяем уравнение позволяющее построить FLD-диаграмму по критерию Свифта:

$$4(e_1 - n)(e_2 + 2e_1)^3 - 3(e_1 - 2n)(e_1 + 2e_2)(e_2 + 2e_1)^2 - 3(e_1 + 2n)(e_1 + 2e_2)^2(e_2 + 2e_1) + 2(2e_1 + n)(e_1 + 2e_2)^3 = 0, \quad (12)$$

где e_1 и e_2 – главные логарифмические деформации, действующие в плоскости листовой заготовки; n – показатель степени степенной аппроксимации кривой деформационного упрочнения 3-го рода $\sigma_s = Ae_i^n$.

Из экспериментальных и теоретических работ известно, что после возникновения рассеянной шейки пластическая деформация образца продолжается, и в дальнейшем может возникнуть локализованная шейка, которая отличается от рассеянной не только размерами, но и тем, что её возникновение и развитие осуществляются в условиях плоской деформации при интенсивном утонении образца по толщине.

Хилл (Hill) в своих работах критерием предельного формоизменения предлагает принять момент образования локальной шейки при котором приращение суммарного усилия равно нулю. При этом предполагается, что локальная шейка будет формироваться под углом ψ к направлению наибольшего главного напряжения. Угол ориентации шейки относительно осей нагрузки имеет вид

$$\psi = \tan^{-1}(\sqrt{-\alpha}), \quad (13)$$

где $\alpha = e_2 / e_1$ – отношение главных деформаций, возникающих в плоскости листа в случае простого (монотонного) нагружения.

С учетом квадратного корня в уравнении (13), данное уравнение имеет физический смысл только при отрицательном значении e_2 .

Преобразуя выражения, полученные в работах Хилла, определяем уравнение позволяющее построить FLD-диаграмму по критерию Хилла:

$$e_1 + e_2 - n = 0. \quad (14)$$

На практике для построения FLD-диаграммы по энергетическим критериям применяют комбинацию двух критериев. Критерий Хилла применяют для отрицательного значения e_2 – уравнение (14), а критерий Свифта для положительного значения e_2 – уравнение (12).

Геометрические критерии прогнозируют предельную деформацию заготовки в момент ее локализации в узкой зоне. Этот момент может быть рассчитан для заготовок с исходной неоднородностью свойств (с дефектами).

Наиболее известным критерием локализации деформации является момент возникновения плоской схемы деформированного состояния в наиболее ослабленной зоне заготовки, который прогнозируется М-К-теорией (теория Марчиньяка и Кужинского). Основным недостатком М-К-теорией является то, что модель работает только в области двухосного растяжения заготовок и

прогнозирует момент локализации деформаций только для заготовок со значительными дефектами. Так как при вытяжке двухосное растяжение на фланце отсутствует, более подробно мы эти критерии рассматривать не будем.

В работах Чумадина А.С. в качестве критерия предельного деформирования принимается локальное или резкое изменение толщины заготовки.

В случае простого(монотонного) нагружения бездефектных заготовок Чумадиным А.С. получена математическая модель предельного деформирования, которая при соответствующих алгебраических преобразованиях с использованием физических соотношений, принятых при построении данной модели, может быть представлена в виде уравнения:

$$2(e_1^2 + e_1 \cdot e_2 + e_2^2)(2e_1 + e_2) - 3e_2^2 - n(2e_1 + e_2)^2 = 0, \quad (15)$$

которое позволяет построить FLD-диаграмму, соответствующую геометрическому критерию.

В работах Сторена и Райса (Storen и Rice) получены аналогичные результаты и в работах некоторых зарубежных авторов FLD-диаграммы, соответствующие уравнению (16), определяются как диаграммы Сторена-Райса.

На рисунке 3 представлены FLD-диаграммы, соответствующие энергетическим критериям (диаграмма Хилла-Свифта) и геометрическому критерию для бездефектных заготовок (диаграмма Сторена-Райса) при различных показателях деформационного упрочнения.

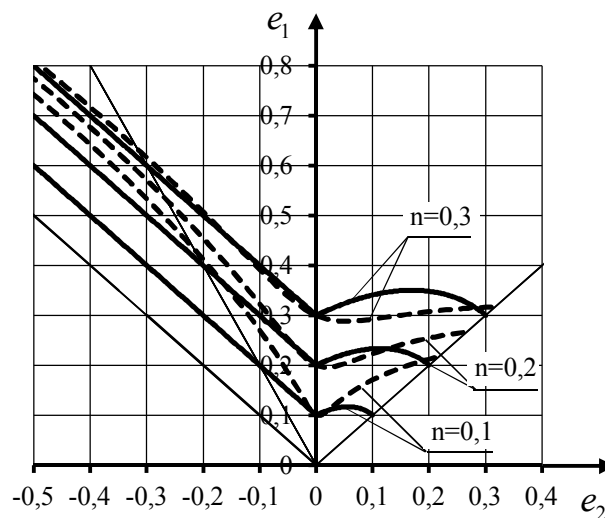


Рисунок 3 – FLD-диаграммы при различных показателях деформационного упрочнения:

————— — диаграмма Хилла-Свифта; - - - - - — диаграмма Сторена-Райса.

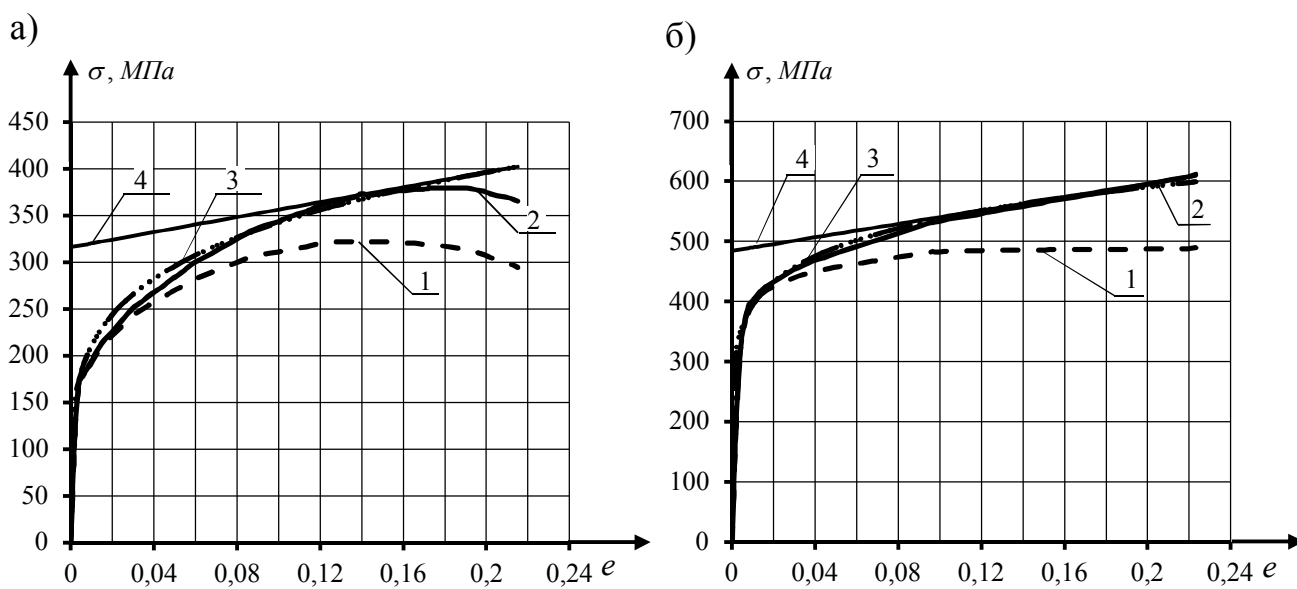
В третьей главе приведены расчётно-экспериментальные исследования технологических процессов изготовления тонкостенных деталей летательных аппаратов.

В разделе 3.1 для проверки точности аппроксимаций, было проведено сопоставление диаграмм истинных напряжений 3-го рода, полученных экспериментально, с приближёнными линейно-степенными

аппроксимирующими функциями, полученными с использованием справочных констант механических свойств металлов. Экспериментальные диаграммы растяжения и показатели механических свойств для различных авиационных материалов брались из справочников Всесоюзного научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ).

Как показали расчёты, максимальная погрешность результирующей аппроксимации для алюминиевых сплавов не превышает 8%, а для титановых сплавов – 3%. На рисунке 4 показаны результаты аппроксимации.

Таким образом, оценка точности построения диаграмм деформирования показала, что предложенный метод аппроксимации позволяет с высокой точностью построить диаграммы деформирования широкого перечня авиационных материала без проведения трудоёмких испытаний по справочным константам механических свойств металлов.



1 – экспериментальная диаграмма условных напряжений;

2 – экспериментальная диаграмма истинных напряжений;

3 – откорректированная степенная аппроксимация, проходящая через две точки и удовлетворяющая свойству диаграммы истинных напряжений;

4 – касательная, отражающая свойство диаграммы истинных напряжений.

Рисунок 4 – Аппроксимация диаграммы истинных напряжений 3-го рода откорректированной линейно-степенной функцией для различных материалов
а – АМг6; б – ВТ1-0

В разделе 3.2 представлен порядок расчёта технологического процесса вытяжки. Проведены расчеты основных параметров и предельных технологических возможностей этого процесса по различным критериям предельного деформирования.

Результаты расчётов без учёта трения на фланце, а также без учёта изгиба-спрямления и трения на ребре матрицы для алюминия Д16М, в случае использования FLD-диаграммы Сторена-Рейса (геометрический критерий) и Хилла-Свифта (энергетический критерий), представлены на рисунках 5 и 6. На

диаграммах сплошной линией показана кривая предельного формоизменения, а точечными линиями показано деформированное состояние фланца при различных положениях наружного края R .

На рисунке 5 видно, что если коэффициент вытяжки меньше предельного и процесс проходит без разрушения, то на всех этапах процесса, линии, характеризующие деформированное состояние фланца, лежат ниже кривой предельного формоизменения.

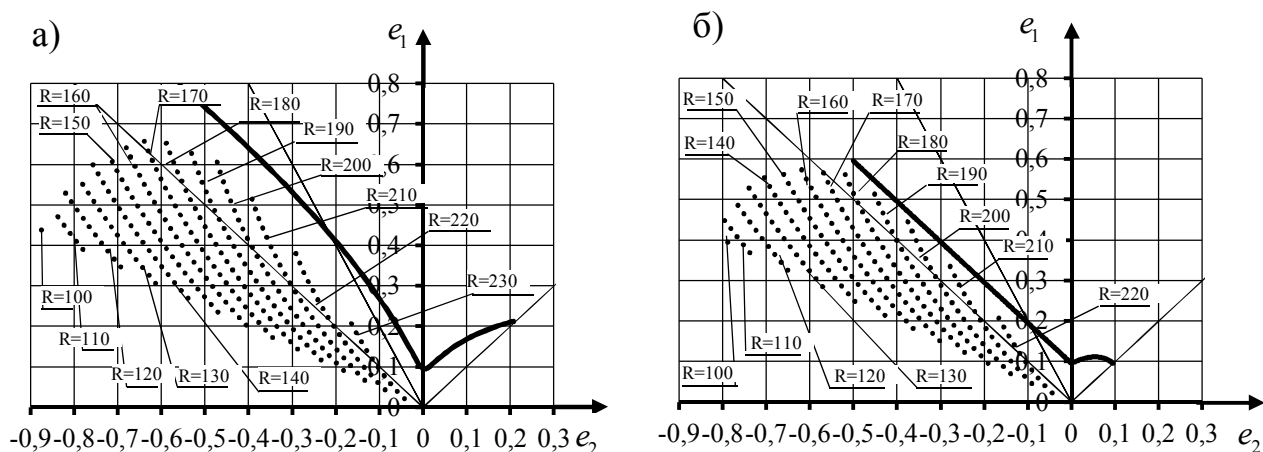


Рисунок 5 – Изменение деформированного состояния фланца для материала Д16М при вытяжке без учёта трения, изгиба и спрямления для различных положений наружного края в случае деформирования без разрушения
а – FLD-диаграмма Сторена-Рейса; б – FLD-диаграмма Хилла-Свифта

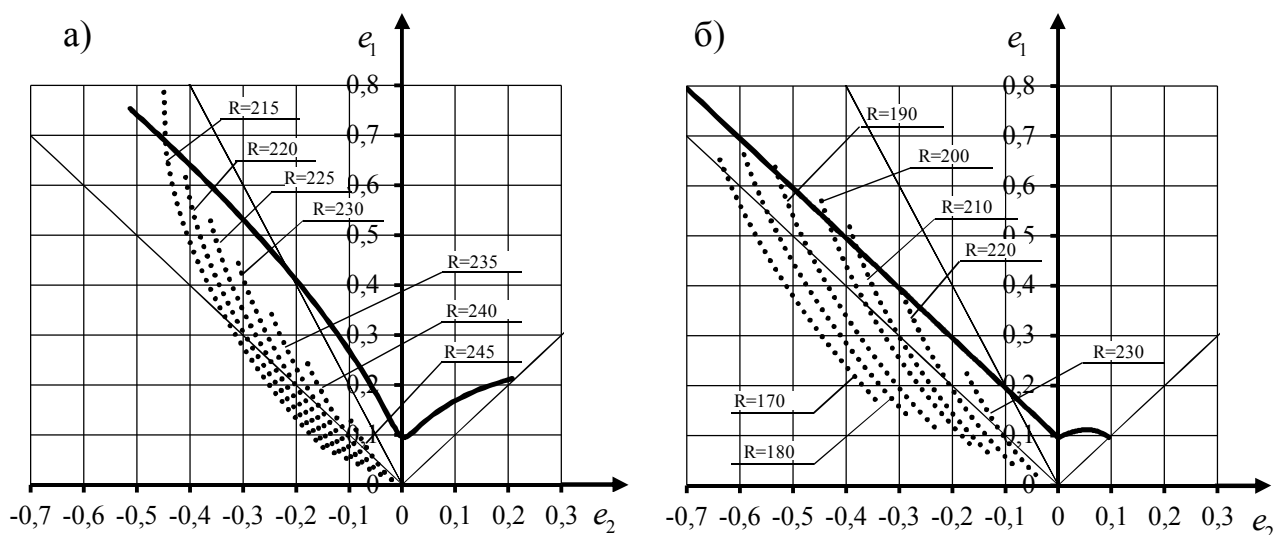


Рисунок 6 – Изменение деформированного состояния фланца для материала Д16М при вытяжке для различных положений наружного края в случае деформирования с разрушением
а – FLD-диаграмма Сторена-Рейса; б – FLD-диаграмма Хилла-Свифта

Как видно на рисунке 6, если коэффициент вытяжки больше предельного, то на определённом этапе процесса, линии, характеризующие деформированное состояние фланца, доходят до кривой предельного формоизменения и попытка

дальнейшего перемещения края фланца приводит к разрушению. Это хорошо видно рисунке 6 а), на примере крайней кривой деформирования. В этом случае растягивающие деформации стремятся к бесконечности и процесс последовательных приближений расходится, то есть наблюдается потеря устойчивости второго рода, что хорошо согласуется с геометрическим критерием предельного деформирования $\frac{dS}{d\rho} \rightarrow \pm\infty$.

Результаты определения предельного коэффициента вытяжки для алюминия Д16М по FLD-диаграмме Сторена-Рейса (геометрический критерий) и по FLD-диаграмме Хилла-Свифта (энергетический критерий) представлены на рисунке 7.

Кривые 1, 2, 3 характеризуют деформированное состояние заготовки в момент возникновения критических деформаций, соответствующих предельному коэффициенту вытяжки. Излом на кривой 3 отражает изменение деформированного состояния при учёте изгиба-спрямления и трения на ребре матрицы.

Аналогичным образом были определены предельные коэффициенты вытяжки для различных алюминиевых и титановых сплавов.

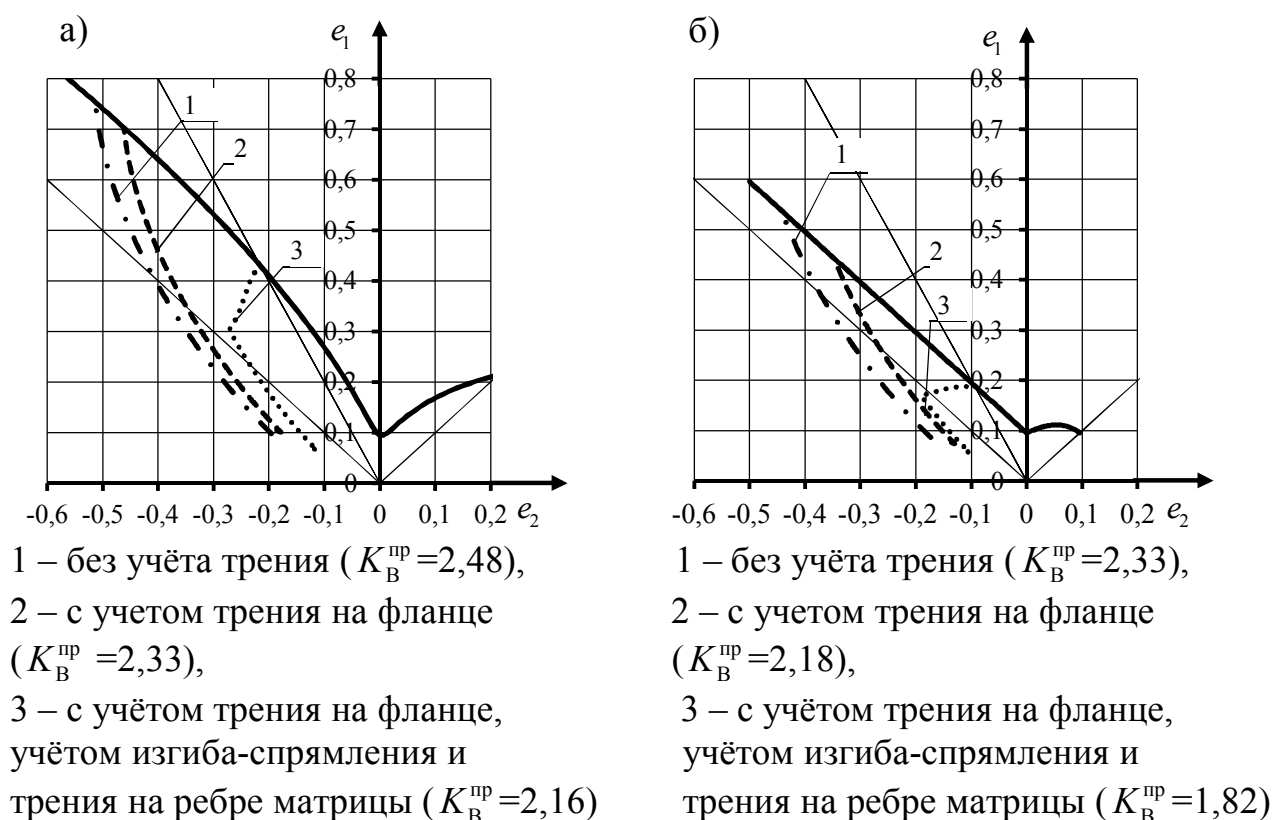
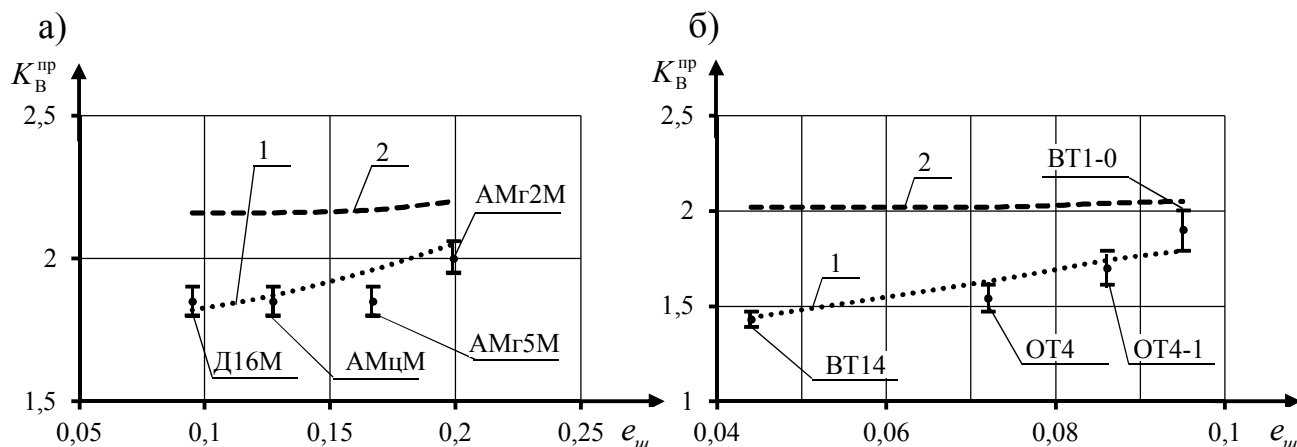


Рисунок 7 – Определение предельного коэффициента вытяжки для материала Д16М по различным диаграммам деформирования а – FLD-диаграмма Сторена-Рейса; б – FLD-диаграмма Хилла-Свифта

Сопоставление рассчитанных значений предельных коэффициентов вытяжки с экспериментальными представлены на рисунке 8.

Экспериментальные значения предельных коэффициентов вытяжки для титановых сплавов взяты из справочника Романовского В.П., а для алюминиевых сплавов из справочника Барановского М.А.



1 – диаграмм Хилла-Свифта; 2 – диаграмм Сторена-Райса

Рисунок 8 – Определение предельного коэффициента вытяжки для различных материалов с учётом трения на фланце, учётом изгиба-спрямления и трения на ребре матрицы

а – алюминиевые сплавы; б – титановые сплавы

Как показал анализ теоретических расчётов, прогнозирование момента разрушения заготовки при вытяжке по FLD-диаграмме Хилла-Свифта (энергетический критерий) позволяет получить для титановых и алюминиевых сплавов наиболее достоверные результаты. Максимальная погрешность определения предельного коэффициента вытяжки по FLD-диаграмме Хилла-Свифта составляет: для титановых сплавов составляет 5,8%, для алюминиевых сплавов – 5,9%. Тогда как погрешность по FLD-диаграмме Сторена-Райса составляет 41,3% и 17,3% соответственно.

В разделе 3.3 представлен порядок расчёта технологического процесса раздачи. Проведены расчеты основных параметров и предельных технологических возможностей этого процесса по различным критериям предельного деформирования.

На рисунке 9 представлены результаты определения предельного коэффициента раздачи для материала Д16М по FLD-диаграммам с использованием различных критериев предельного деформирования. Как видно на рисунках, если коэффициент раздачи меньше предельного и процесс проходит без разрушения, то на всех этапах процесса, линии, характеризующие деформированное состояние трубчатой заготовки, лежат ниже кривой предельного формоизменения. А если коэффициент раздачи больше предельного, то на определённом этапе процесса, линии, характеризующие деформированное состояние, доходят до кривой предельного формоизменения, и попытка дальнейшего увеличения радиуса раздачи R приводит к разрушению. Это хорошо видно на примере крайней кривой, отражающей деформированное состояние заготовки.

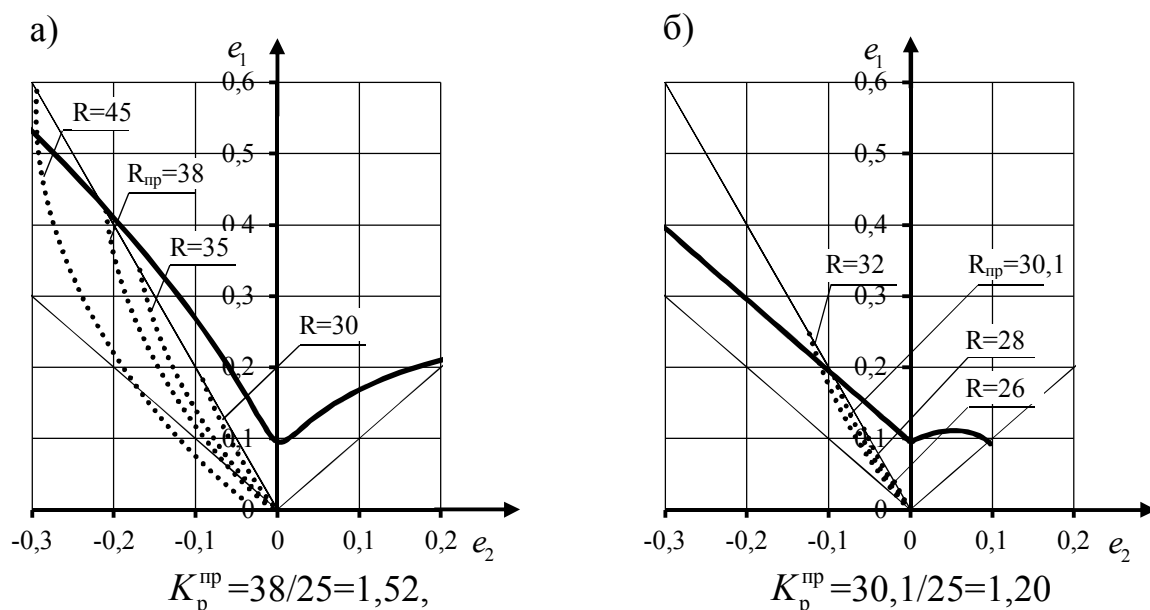
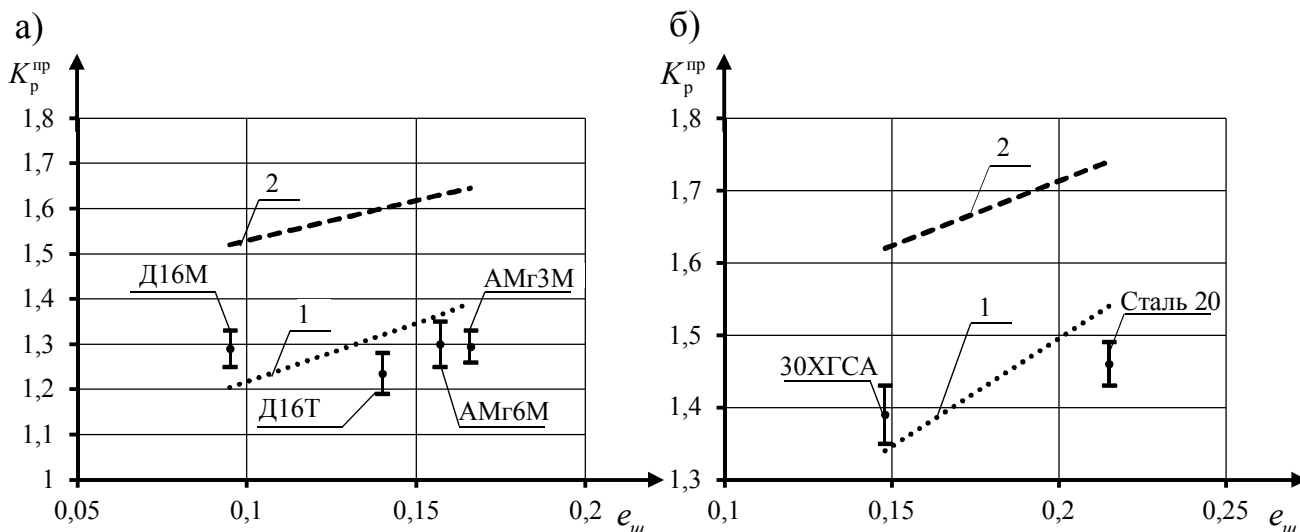


Рисунок 9 – Определение коэффициента раздачи для материала Д16М по различным диаграммам деформирования

$$R_0 = 25\text{мм}; S_0 = 1\text{мм}; \alpha_k = 20^\circ; \mu_{TP} = 0,1$$

а – FLD-диаграмма Сторена-Рейса; б – FLD-диаграмма Хилла-Свифта

Аналогичным образом были определены предельные коэффициенты раздачи для различных алюминиевых сплавов и авиационных конструкционных сталей.



1 – диаграмм Хилла-Свифта; 2 – диаграмм Сторена-Райса

Рисунок 10 – Определение предельного коэффициента раздачи для различных материалов

$$R_0 = 25\text{мм}; S_0 = 1\text{мм}; \alpha_k = 20^\circ; \mu_{TP} = 0,1$$

а – алюминиевые сплавы; б – авиационные конструкционные стали

Сопоставление рассчитанных значений предельных коэффициентов раздачи с экспериментальными представлены на рисунке 10.

Экспериментальные значения предельных коэффициентов раздачи для алюминиевых сплавов и авиационных конструкционных сталей взяты из справочника Ковка и штамповка, т.4, под общ. ред. С.С. Яковлева.

Как показал анализ теоретических расчётов, прогнозирование момента разрушения заготовки при раздаче по FLD-диаграмме Хилла-Свифта (энергетический критерий) позволяет получить для алюминиевых сплавов и для авиационных конструкционных сталей наиболее достоверные результаты. Максимальная погрешность определения предельного коэффициента раздачи по FLD-диаграмме Хилла-Свифта составляет: для алюминиевых сплавов 6,9%, для авиационных конструкционных сталей 5,5%. Тогда как погрешность по FLD-диаграмме Сторена-Райса составляет 29,0% и 19,2% соответственно.

В приложениях приведены программы построения диаграмм деформирования по типовым справочным характеристикам материалов, программы определения напряжённо-деформированного состояния и предельных технологических возможностей для вытяжки и раздачи с применением FLD-диаграмм. Все программы, созданные для проведения численной апробации разработанных методик, написаны с использованием специального математического пакета MathCAD.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 Анализ технологических процессов изготовления тонкостенных деталей летательных аппаратов показал, что для более достоверного определения предельных технологических возможностей этих процессов необходима разработка усовершенствованных методов, основанных на современных теориях предельного деформирования.

2 Математическое моделирование формоизменяющих операций листовой штамповки позволило разработать единый подход создания математических моделей получения деталей из листовых и трубчатых заготовок, позволяющий учитывать такие дополнительные факторы, как физическую и геометрическую нелинейность. Сущность этого подхода заключается в получении интегральных уравнений для истинных (логарифмических) деформаций, дальнейшем решении этих уравнений методом переменных параметров упругости и определении напряженно-деформированного состояния.

3 Предложенная аппроксимация кривой деформационного упрочнения позволяет с большой точностью описать эту кривую аналитически, используя типовые справочные характеристики материалов и общие свойства кривой упрочнения для истинных напряжений, что позволяет при проведении технологических расчетов не проводить многочисленные механические испытания материала.

4 Разработана методика расчета предельных деформаций, основанная на энергетических и геометрических (кинематических) критериях с учетом реальных механических характеристик материала, позволяющие значительно упростить использование FLD-диаграмм для расчета предельных

технологических возможностей процессов листовой штамповки при использовании численно-аналитических методов расчета.

5 Проведенные исследования процессов вытяжки и раздачи тонкостенных деталей и расчет технологических возможностей этих процессов с применением FLD-диаграмм показали, что прогнозирование момента разрушения заготовки по диаграмме Хилла-Свифта (энергетический критерий) позволяет получить для титановых и алюминиевых сплавов наиболее достоверные результаты, что подтверждается сравнением аналитических расчётов с опубликованными экспериментальными данными.

6 В конечном итоге разработанные усовершенствованные методики расчета предельных технологических возможностей существенно повысили точность прогноза предельной степени формоизменения заготовки в процессах изготовления тонкостенных деталей летательных аппаратов, что дает возможность повысить качество проектирования технологических процессов и, соответственно, качество получаемых деталей.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК.

1 **Чжо Заяр Со.** Определение предельного коэффициента вытяжки титановых и алюминиевых сплавов по FLD-диаграммам / С.И. Феоктистов, Чжо Заяр Со // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2019. – № 5. – С. 27 – 34.

2 **Чжо Заяр Со.** Определение предельного коэффициента раздачи по FLD-диаграммам / С.И. Феоктистов, Чжо Заяр Со // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2019. – № 9. – С. 22-27.

Публикации включённые в базу цитирования Scopus.

3 **Kyaw Zayar Soe.** Method for construction of forming limit diagram by using reference mechanical characteristics of the metal / Kyaw Zayar Soe, S.I. Feoktistov // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 945. – P. 833-838.

4 **Kyaw Zayar Soe.** Simulation of thin-walled workpieces ends expanding for pipelines making / Kyaw Zayar Soe, S.I. Feoktistov, D A Potianikhin, B N Maryn // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.– 2019. – Vol. 510. 012015.

Публикации в других изданиях.

5 **Чжо Заяр Со.** Аппроксимация диаграммы истинных напряжений линейно-степенной функцией / С.И. Феоктистов, Чжо Заяр.Со// Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 47-й научно-технической конференции студентов и аспирантов. Э.А. Дмитриева (отв. ред.) . 2017. С. 1178-1184.

6 **Чжо Заяр Со.** Метод построения диаграммы предельного формоизменения с использованием справочных механических характеристик металла/ С.И. Феоктистов, Чжо Заяр.Со // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы всероссийской научно-технической

конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 09-20 апреля 2018 г.: в 2 частях / редкол.: Э. А. Дмитриева (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2018. – Ч. 2 – С. 499-506.

7 **Чжо Заяр Со.** Методика расчета процессов обжима и раздачи трубных заготовок по криволинейной оправке / С.И. Феоктистов, Чжо Заяр.Со // Молодёжь XXI век: VII-я научно-практич. конф., Арсеньев, 13 апреля 2018 г. / под общ. ред. Ю.П. Денисенко, О.Ш. Бердиева. - Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2018. – С. 92-99.

8 **Чжо Заяр Со.** Методика расчета процесса формовки жидкостью и газом/ С.И. Феоктистов, Чжо Заяр Со // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2019 г.: в 3 ч. / редкол.: Э. А. Дмитриева (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2019. – Ч. 3 – С. 156-159.

9 **Чжо Заяр Со.** Определение технологических возможностей титановых и алюминиевых сплавов при раздаче/ С.И. Феоктистов, Чжо Заяр.Со // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2019. № I-1 (37). С. 4-9.

Подписано в печать 16.10.2019.

Формат 60 × 84 1/16. Бумага 80 г/м². Ризограф EZ570E.

Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 29869.

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

