

На правах рукописи



Хейн Вин Зо

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК  
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность: 05. 07. 02

"Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов"

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

**Москва 2015**

Работа выполнена на кафедре «Технология производства летательных аппаратов» ФГБОУ ВПО «МАТИ» - Российском государственном технологическом университете имени К.Э. Циолковского.

- Научный консультант:** **Чумадин Анатолий Семенович**  
доктор технических наук, профессор
- Официальные оппоненты:** **Буренин Анатолий Александрович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
член-корреспондент РАН, директор ФГБУН  
«Институт машиноведения и металлургии  
Дальневосточного отделения РАН»  
(г. Комсомольск-на-Амуре)  
**Михеев Анатолий Егорович**,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой летательных аппаратов  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный  
аэрокосмический университет имени академика  
М.Ф. Решетнева» (г. Красноярск)  
**Корольков Владимир Иванович**,  
доктор технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой самолетостроения ФГБОУ ВПО  
«Воронежский государственный технический  
университет» (г. Воронеж)
- Ведущая организация:** Филиал публичного акционерного общества  
«Авиационная холдинговая компания «Сухой»  
«Комсомольский-на-Амуре авиационный завод  
имени Ю.А. Гагарина»

Защита состоится «19» февраля 2016 г. в «14» часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.092.06 в ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201 корпус 3. Факс: 8(4217) 53-61-50; e-mail: [dgk@knastu.ru](mailto:dgk@knastu.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета» и на сайте ФГБОУ ВПО КнАГТУ по адресу: <http://www.knastu.ru/dissertationannouncer.html>

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим присылать по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Колыхалов  
Дмитрий Геннадьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и состояние проблемы.** Авиационное и ракетно-космическое производство характеризуется тесными связями со всеми отраслями промышленности, где используются самые последние достижения науки, техники и технологии.

Одной из важнейших проблем в авиа-и ракетостроении является изготовление конструкций с повышенным ресурсом, отличающихся большим уровнем безотказности и живучести. Особое внимание в этой проблеме отводится повышению эффективности использования процессов листовой штамповки, различными методами которой изготавливается до 75% деталей планера самолета.

Другой, не менее важной проблемой современного производства летательных аппаратов, является увеличение производительности труда, повышение технологичности производства и качества конечного продукта за счет интенсификации существующих и разработки новых технологических процессов формообразования. Эти мероприятия в комплексе призваны снизить материалоемкость конструкции при одновременном увеличении жесткости и удельной прочности, расширить сферу применения высокопрочных, труднодеформируемых материалов при производстве деталей летательных аппаратов. Все это положительно скажется на повышении точности и монолитности конечных деталей, приведет к снижению их весовых показателей, что в конечном итоге влияет на массу конечного изделия. Расчеты показывают, что при одной и той же полезной нагрузке снижение массы изделия на 1-2% приводят к увеличению дальности полета на 5-6%.

При создании авиационной и ракетной техники особое внимание уделяется изготовлению их трубопроводных систем. По причине разрушений трубопроводов летательных аппаратов наблюдается большое количество отказов, до 15-20% всех аварий и катастроф, поскольку трубопроводы работают в сложных условиях комплексного нагружения: перепады давления, пульсирующая нагрузка, большой диапазон температур, гидравлические удары.

В связи с этим, к материалам, из которых изготавливаются элементы трубопроводов, предъявляются высокие требования по механическим свойствам, а в процессе оценки качества изготовления отслеживаются шероховатости внешней и внутренней поверхности, соответствие формы сечения заданным размерам, а также оценивается минимальное утонение стенок.

По объему холоднодеформируемых изделий элементы трубопроводов в конструкции летательных аппаратов составляют до 15%. Трудоемкость изготовления трубопроводов составляет до 10% от трудоемкости всех заготовительно-штамповочных работ.

Как показывает эксплуатация, трубопроводы разрушаются по причине утонений в зонах изгибов или в зонах резкого изменения диаметров. К причинам низкой работоспособности можно отнести эллипсность, волнистость стенок, то есть те факторы, которые зависят от технологического процесса формоизменения заготовок.

Это приводит к выводу о том, что технологические процессы формообразования должны обеспечивать высокие механические характеристики

материала труб, качество внутренней и внешней поверхностей, минимальное искажение формы поперечного сечения трубы и минимальных утонений в зонах локальных деформаций. Таким образом, разработка новых принципиальных способов изготовления труб из алюминиевых, стальных, титановых трубных заготовок, повышение технологичности производства, а также повышение эффективности существующих способов, становятся весьма **актуальными задачами**.

При этом в направлении повышения эффективности существующих процессов можно выделить два пути. Первый связан с температурной интенсификацией (изотермический или дифференцированный нагрев материала заготовки) и силовой интенсификацией (дополнительная нагрузка к заготовке). Но наиболее эффективно совместное их применение, т.е. температурно-силовая интенсификация.

Температурное воздействие (дополнительный дифференциальный нагрев) позволяет в большинстве процессов формообразования регулировать толщину стенки, а также повышать коэффициенты обжима и раздачи.

Силовое воздействие заключается в распределении локальных деформаций, при критических степенях деформирования по всему очагу деформации. Совмещение этих факторов приводит к увеличению предельных степеней формоизменения. Также к силовому способу можно отнести осевой подпор заготовки в процессе раздачи.

В диссертационной работе, на базе проведенных исследований, а также численного моделирования процессов деформирования, разработаны рекомендации по интенсификации технологических процессов формообразования трубных заготовок, позволяющие значительно повысить технологичность изготовления деталей летательных аппаратов из трубных заготовок. С учетом соблюдения рекомендаций можно достигнуть увеличения коэффициента деформации трубных заготовок до двух раз за один переход, повысить точность изготовления и качество внутренней и внешней поверхностей. При этом трудоемкость и себестоимость изготовления практически не изменяются, улучшаются физико-механические характеристики, увеличивается ресурс деталей.

Таким образом, разработанные методы и средства управления процессом формообразования трубных заготовок позволяют снизить производственные издержки, сократить общий объем ручных доводочных работ, повысить технологичность изготовления новых деталей из труднодеформируемых сплавов.

Диссертационная работа была выполнена на кафедре «Технология производства летательных аппаратов» ФГБОУ ВПО «Московский авиационно-технологический институт – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского».

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности существующих технологических процессов формообразования, разработка и исследование новых технических решений по формообразованию трубных заготовок для обеспечения технологичности и высокого качества деталей ЛА.

Для достижения цели работы были сформулированы и решались следующие **задачи**:

- разработка математической модели процесса формообразования деталей гидрогазовых систем ЛА для задач осесимметричного и асимметричного деформирования с нагревом и без нагрева;

- разработка и исследование новых способов раздачи деталей гидрогазовых систем ЛА при различных способах деформирования (гибка-раздача по жесткому пуансону, обжим и раздача при помощи жестких пуансонов, при помощи эластичных и эластосыпучих сред, ротационный обжим и раздача)

- проведение исследований и разработка математической модели процессов формообразования деталей гидрогазовых систем ЛА с применением жестких пуансонов, с учетом одновременного воздействия термической и силовой составляющей интенсификации технологического процесса;

- проведение исследований и разработка численной модели процесса обжима и раздачи трубных заготовок с использованием эластичных и эластосыпучих сред;

- проведение исследований локальной деформации при раскатке и ротационном обжиге труб, разработка математической модели процесса раскатки и ротационного обжима трубных деталей гидрогазовых систем ЛА на основе энергетического метода баланса работ;

- установление качественных и количественных характеристик наиболее рациональных технологических процессов формообразования деталей из трубных заготовок;

- разработка рекомендаций по выбору схемы деформирования и проектированию технологической оснастки для производства деталей гидрогазовых систем ЛА;

- разработка перспективных способов формообразования трубных заготовок с применением мощных импульсов токов.

- проверка адекватности разработанных моделей путем экспериментальных металлографических исследований и прочностных испытаний.

В диссертационной работе были использованы следующие **методы исследования**:

- численное моделирование процессов обжима и раздачи трубных заготовок с использованием теории пластичности и вариационных методов расчета;

- анализ влияния технологических факторов производства деталей на их качественные показатели;

- конечно-элементное моделирование процессов формообразования деталей из трубных заготовок;

- экспериментальные металлографические исследования макро - и микроструктуры натуральных образцов изделий;

- испытания образцов трубных изделий на статическую и усталостную прочность, виброиспытания, химический анализ поверхности после штамповки.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующем:

- разработана математическая модель формообразования деталей гидрогазовых систем ЛА из трубных заготовок по жесткому пуансону с учетом

влияния определяющих факторов процесса, а именно: сил трения, упрочнения материала трубной заготовки в процессе деформации, силовой и термической составляющих процесса;

- разработана математическая модель процесса формообразования деталей гидрогазовых систем ЛА из трубных заготовок с использованием эластичных и эластосыпучих сред, проведено конечно-элементное моделирование, выявлены предельные характеристики технологического процесса;

- разработана математическая модель для расчета параметров технологического процесса при раскатке и ротационном обжиге концевой участка трубы с учетом внеконтактных деформаций, сил контактного трения между подпором и заготовкой, изменения механических характеристик материала трубных заготовок в результате обработки в несколько переходов;

- впервые получены результаты комплексных экспериментальных исследований характеристик изделий трубопроводов ЛА из алюминиевых сплавов, нержавеющей стали, титановых сплавов на различные виды нагружений, на основании которых разработан комплекс рекомендаций по силовой и температурной интенсификации;

- на основе металлографических исследований формоизмененных трубных заготовок получены микро-и макроструктурные данные, на основании которых сделаны выводы о предельно допустимых стадиях процессов формообразования деталей ЛА из трубных заготовок.

Достоверность диссертационной работы основывается на использовании известных уравнений механики деформируемого твердого тела, использовании лицензионных программных продуктов конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния конструкций, подтверждаемого экспериментальными и расчетными данными, удовлетворительной сходимостью теоретических, расчетных и экспериментальных данных.

**Практическая значимость** работы заключается в следующем:

- разработан комплекс рекомендаций по проведению проектно-конструкторских работ с учетом обеспечения технологичности проектируемых деталей за счет выбора рациональных режимов проведения технологических процессов формообразования деталей гидрогазовых систем ЛА;

- разработаны методика расчета процессов формообразования деталей ЛА из трубных заготовок с учетом интенсифицирующих факторов, предложены новые конструкции технологической оснастки, новые способы формообразования концевых участков трубных заготовок;

- на основе проведенных экспериментов получены эмпирические выражения для расчета технологических параметров процесса обработки трубных заготовок с учетом влияния сил контактного трения, внеконтактных деформаций и внешних сил;

- разработан комплекс рекомендаций по силовой и температурной интенсификации процессов формообразования трубных заготовок, определены рациональные режимы проведения технологических процессов, предложены эффективные пути совершенствования процессов ротационного обжига и раздачи деталей ЛА из трубных заготовок;

- разработаны программные продукты автоматизированного расчета параметров технологического процесса ротационного обжима и раскатки, получены коэффициенты Муни-Ривлина для различных типов эластичной и эластосыпучей среды, приведены рекомендации по выбору формы конечного элемента при конечно-элементном моделировании процессов формообразования трубных заготовок;

#### **Результаты работы:**

- использованы в проектировании, конструкции и производстве самолетов в ООО Научно-производственное объединение «АэроВолга» (446370, Самарская область, Красноярский район, с. Красный Яр, а/я 17, e-mail: [aerovolga.63@mail.ru](mailto:aerovolga.63@mail.ru)) при разработке трубных полуфабрикатов, позволяющие повысить качество изготавливаемых деталей, определить рациональные режимы обработки, обеспечивающие высокую степень деформации трубы при заданном качестве трубных деталей и подтверждает, что предложенный способ повышает производительность формоизменения в 1,5-2,0 раза. Имеется акт об использовании результатов работы;

- использованы для корректировки при производстве компонентов авиационной техники в ЗАО «Санкт-Петербургская авиаремонтная компания» (196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д.12, e-mail: [info@sparc.spb.ru](mailto:info@sparc.spb.ru)). Установлено что процесс ротационного обжима труб в 1,2-1,5 раза повышает предельные деформации заготовки по сравнению с обжимом на матрице, при этом существенным фактором становится время обработки. Снижение времени обработки при увеличении деформирующего усилия повышает степень формоизменения заготовок. Имеется акт об использовании результатов работы.

**Апробация работы** подтверждена участием и докладами на следующих конференциях:

1. Актуальные проблемы российской космонавтики. XXXIV академические чтения. Секция № 19. МГТУ им. Н.Э. Баумана (2010 г.);
2. Международная молодежная научная конференция «XXXVI Гагаринские чтения». Секция № 5. МАТИ им. К.Э. Циолковского (2011 г.);
3. Международная молодежная научная конференция «XXXVII Гагаринские чтения». Секция № 5. МАТИ им. К.Э. Циолковского (2012 г.);
4. Пятая международная конференция "Распределённые вычисления и Грид-технологии в науке и образовании" Лаборатория информационных технологий ОИЯИ (2012 г.);
5. Международная молодежная научная конференция «XXXVIII Гагаринские чтения». Секция № 5. МАТИ им. К.Э. Циолковского (2013 г.);
6. V Международная научная конференция «Наука и образование в современной России» Министерство образования и науки РФ (2013 г.);
7. Актуальные проблемы российской космонавтики. XXXIII академические чтения. Секция № 19. МГТУ им. Н.Э. Баумана (2013 г.);
8. Международная научная конференция «Современные проблемы науки и образования» Министерство образования и науки РФ 25-27 февраля 2014г.
9. Международная научная конференция «Приоритетные направления развития науки, технологий и техники» Италия (Рим) 12-19 апреля 2014 г.

10. Международная научная конференция «Современные наукоемкие технологии» Израиль 25 апреля - 2 мая 2014г.

11. Актуальные вопросы науки и образования. Министерство образования и науки РФ 20-23 мая 2014 г.

12. III Московская конференция по международной безопасности. Министерство обороны РФ 23-24 мая 2014г.

13. Международная научно-техническая конференция «Энергоэффективность-2014». Минск, Беларусь, 14-16 октября 2014 г.

14. Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные исследования в области создания инновационных технологий и новых материалов, направленных на развитие авиационных и космических комплексов», Комсомольск-на-Амуре, 12-16 мая 2015 г.

15. Международная научно-техническая конференция «Интеллектуальные материалы 2015», Германия (Киль), 10-12 июня 2015 г.

**Публикации.** Основное содержание диссертации раскрыто в 29 научных трудах, в том числе в 16 статьях, опубликованных в журналах рекомендуемого ВАК перечня.

**Личный вклад.** Все основные положения диссертации, теоретические исследования, моделирование, экспериментальные работы, разработка программно-расчетных комплексов выполнены лично соискателем.

**Структура и объем диссертации.** Представленная работа включает в себя введение, пять глав, общие выводы по работе, список использованных источников и приложения. Диссертация содержит 388 страниц основного текста, 259 рисунков, 70 таблиц, 2 приложения. Список литературы содержит 214 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, определена научная новизна и практическое значение полученных результатов.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние исследований в области формообразования трубных заготовок. Приведена классификация трубных заготовок, по результатам которой были сделаны выводы, что элементы трубопроводов пневмогидросистем ЛА состоят из деталей типа переходник, тройник, фитинг, фланец, законцовка, муфта.

По форме патрубки могут быть прямыми, изогнутыми. Диаметры патрубков находятся в диапазоне 6...100 мм, при этом радиусыгиба достигают предельных значений, равных 0,5 диаметра патрубка. Соотношения диаметров, при резком переходе от одного диаметра к другому могут достигать соотношения 2:1. Толщина стенок трубных заготовок 0,5...2,5 мм.

Теоретическими и практическими вопросами исследования напряженно-деформированного состояния материалов при пластическом деформировании занимались многие российские и зарубежные ученые: Ю.Н. Алексеев, В.И.

Глазков, М.Н. Горбунов, В.И. Ершов, А.А. Ильюшин, Е.И. Исаченков, В.Г. Капорович, Ш. Кобаяси, С. Колпакчиогли, В.Г. Кононенко, Н.Н. Малинина, Б.Н. Марьин, А.Д. Матвеев, Н.И. Могильный, А.Г. Овчинников, Е.А. Попов, О.В. Попов, Г.А. Смирнов-Аляев, М.В. Сторожев, Р.И. Тавасшерна, Э. Томсен, С.И. Феоктистов, А.И. Целиков, А.С. Чумадин, В.Б. Юдаев, Л.Г. Юдин, С.П. Яковлев и др.

Несмотря на высокую значимость для теории, практики и производства работ, проведенных вышеуказанными учеными, решение проблем формовки, при сложных схемах формообразования труднодеформируемых трубных заготовок, еще далека от завершения. Анализ работ показал, что необходимо продолжение исследований в направлении интенсификации процессов деформирования трубных заготовок, а также в направлении разработки новых способов деформирования.

Проведен анализ существующих технологических процессов производства осесимметричных и асимметричных деталей методом обжима и раздачи.

Процесс раздачи трубной заготовки может проходить по-разному: в результате наталкивания трубной заготовки на жесткий пуансон, в результате давления эластичной или эластосыпучей среды, при ротационных процессах раскатки и т.д. Установлено, что сопротивление деформации  $\sigma$  в значительной степени зависит от степени деформации  $\varepsilon$ , температурной нагрузки  $\theta$  и скорости протекания деформации  $\xi$ . Эти три параметра в обязательном порядке должны входить в математическую модель, т.е.  $\sigma_s = f(\varepsilon, \xi, \theta)$ . Примем, что процесс раздачи проходит монотонно, пластическая деформация увеличивается равномерно при продвижении трубы в осевом направлении. Примем гипотезу о несжимаемости материала заготовки и используем ассоциированный закон течения. Уравнение состояния в данном случае принимает следующий вид:

$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2\lambda \xi_{ij}$$

где  $\lambda$  - коэффициент пропорциональности между девиаторами напряжений  $D_\sigma$  и скоростей деформаций  $D_\xi$ .

Подставим уравнение в выражение интенсивности касательных напряжений:  $T = \left( \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \right)^{1/2}$ , где  $S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}$ , получим:

$$T = \left( \frac{1}{2} 4\lambda^2 \xi_{ij} \xi_{ij} \right)^{1/2} = \lambda (2\xi_{ij} \xi_{ij})^{1/2},$$

Примем во внимание, что  $(2\xi_{ij} \xi_{ij})^{1/2} = H$  - есть интенсивность скоростей деформаций сдвига. Получим  $\lambda = T/H$ . Показатель  $T$  будем определять из экспериментальных данных при одноосном растяжении или сжатии образцов. С учетом гипотезы единой кривой при одноосном растяжении  $\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0$ ,  $\sigma_{ij} = 0$ ,  $i \neq j$ . Тогда

$$T = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_{11} - \sigma)^2 + 2\sigma^2] \right\}^{1/2}$$

$$\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{11} \Rightarrow T = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{4}{9} \sigma_{11}^2 + \frac{2}{9} \sigma_{11}^2 \right) \right]^{1/2}$$

$$T = \sigma_{11} / \sqrt{3}$$

Как было показано выше, функция упрочнения  $\sigma_s = f(\varepsilon, \xi, \theta)$ , следовательно  $T = \sigma_s / \sqrt{3}$ .

Необходимо отметить, что уравнения можно применять и для простого, и для сложного случая нагружений.

Рассмотрено оборудование и технологическое оснащение для обжима и раздачи трубных заготовок, проведен обзор средств моделирования, а также обзор теоретических исследований процессов обжима и раздачи осесимметричных и неосесимметричных деталей. Рассмотрены определяющие факторы процесса раздачи, а также основные пути интенсификации. Приведены перспективные способы раскатки и ротационного обжима концевых участков длинномерных трубных заготовок

Детали гидрогазовых систем могут быть изготовлены при помощи ротационного деформирования в локальных зонах. При ротационном методе используются следующие схемы процесса обработки: ротационная вытяжка по закону «синуса» и с отступлением от этого закона.

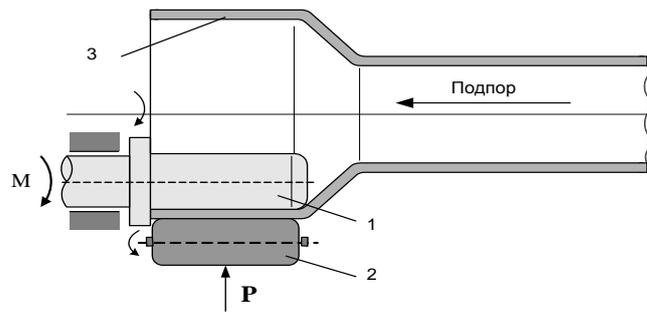


Рис. 1. Схема раскатки труб с подпором кромки (патент РФ № 2104112):  
1-внутренняя оправка (ведущая); 2- ведомая наружная оправка (давлильная);  
3- трубная заготовка

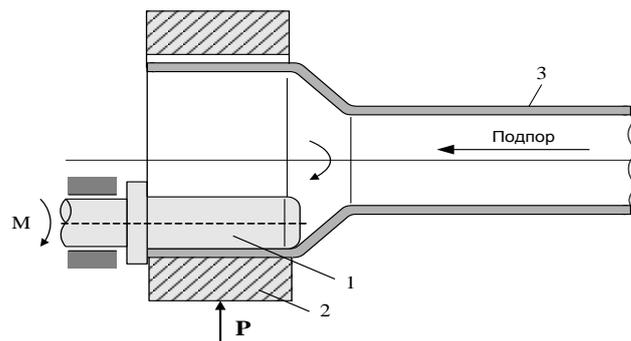


Рис. 2. Схема раскатки труб с внутренним подпором кромки и наружным давлильным кольцом: 1- внутренняя оправка (подпор); 2- наружное давлильное кольцо;  
3-трубная заготовка

Ротационный обжим и раскатка дают возможность существенно повысить предельные возможности формоизменения трубных заготовок и получать детали типа «переходник». За счет повышенной степени деформации данные процессы могут быть рассмотрены как дополнительные после традиционных процессов

раздачи и обжима трубных заготовок по жестким пуансонам. При этом можно использовать методы предварительной подготовки трубных заготовок к формоизменения за счет термической обработки. Процессы, показанные на рисунках на сегодняшний день малоисследованы в технологическом плане, их изучение и выработка методических рекомендаций позволит получать детали типа «переходник» с большими суммарными перепадами диаметров.

Проведенный анализ процессов формообразования трубных заготовок при помощи эластичных и сыпучих тел позволил выявить основные характеристики, которые определяют данный процесс и сделаны выводы о возможности применения температурной интенсификации процесса.

**Таким образом, в первой главе:** были установлены определяющие факторы процессов формообразования; показано влияние электроимпульсной обработки на прочностные характеристики материалов трубных заготовок; проанализированы предельные возможности процесса гибки-раздачи с учетом различных факторов; проанализированы предельные возможности ротационных процессов формообразования трубных заготовок; проанализированы процессы формообразования трубных заготовок при помощи эластичных и сыпучих сред, определены факторы, влияющие на повышение эффективности данного процесса. Сформулированы теоретические и практические задачи при производстве элементов пневмогидросистем ЛА.

**Во второй главе** приведено построение математических моделей процесса формообразования трубных заготовок по жестким пуансонам, способом ротационного обжима и раздачи и при помощи эластичных и сыпучих сред.

*Рассмотрим формообразование по жестким пуансонам.* При перемещении по пуансону происходит деформация стенки трубной заготовки, которая сопровождается нагревом. Таким образом, между трубной заготовкой и пуансоном происходит теплообмен. На деформацию трубной заготовки (формоизменение) существенное влияние будут оказывать следующие факторы:

- геометрические параметры пуансона;
- величина трения между контактируемыми объектами трубной заготовки и пуансоном;
- температура нагрева пуансона;
- толщина стенки трубной заготовки и др.

Таким образом, разрабатываемая математическая модель должна учитывать все задаваемые технологические параметры процесса и ответить на вопрос о возможности самого процесса раздачи трубной заготовки.

Зададимся исходными условиями. Примем, что пуансон является абсолютно жестким телом. В качестве деформируемого объекта будем рассматривать только трубные заготовки. Примем, что пуансон может вращаться относительно своей оси.

Следовательно, наблюдаются два основных процесса. Первый процесс – нестационарный режим раздачи, при котором под давлением со стороны упорного кольца трубная заготовка надвигается на пуансон. Второй процесс – стационарный режим, при котором при надвигании конец трубной заготовки уже приобрел радиус  $R_1$  (рис. 3).

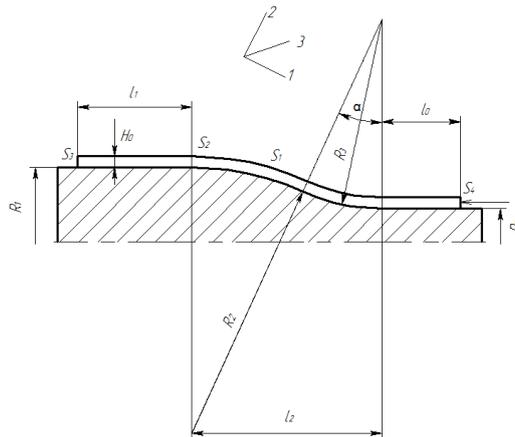


Рис. 3. Стационарный режим раздачи по жесткому пуансону

Математическая модель построена на основе, предложенного В.И. Одиноквым, бескоординатного метода решения уравнения пластического течения. Приведена инженерная и математическая постановка задачи.

Полагаем, что рассматриваемая область осесимметричного тела вращения находится в пластическом состоянии. Материал трубной заготовки, подвергаемый деформации принимаем несжимаемым и изотропным. Инерционными и массовыми силами при продвижении трубной заготовки на пуансон пренебрегаем, скорость деформации считаем медленной.

Введем Эйлерову систему координат и опишем процесс системой уравнений, с учетом выражений

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_3} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{3i}}{\partial x_3} = 0; \quad i = 1, 2, 3; \quad \frac{\partial \theta}{\partial x_3} = 0.$$

Для нестационарного режима

$$\sigma_{ij,j} = 0; \quad \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2\lambda \xi_{ij}; \quad \xi_{ij} = 0,5(v_{i,j} + v_{j,i}) \\ \xi_{ii} = 0; \quad \dot{\theta} = \alpha \Delta \theta + F / c\rho; \quad \lambda = T/H; \quad H = 2(\xi_{ij} \xi_{ij})^{1/2}; \quad T = T(\varepsilon, \xi^*, \theta),$$

где  $\sigma_{ij}$  – действующие напряжения;  $\xi_{ij}$  – составляющая компонентов тензоров скорости деформаций,  $v_i$  – составляющая компонентов скорости перемещения,  $\rho$  – плотность,  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности,  $c$  – теплоемкость,  $\delta_{ij}$  – показатель Кронекера,  $\theta$  – действующая температура,  $\varepsilon$  – степень деформации,  $\xi^*$  – действующая скорость деформации  $\xi^* = H/\sqrt{3}$ ;  $F = T \cdot H$  – показатели плотности внутренних источников (диссипация мощности внутренних сил). Приведенная зависимость  $T = T(\varepsilon, \xi^*, \theta)$ , – получается из экспериментальных исследований при одноосном растяжении-сжатии.

При стационарном режиме система уравнений остается в силе за исключением уравнения для теплопроводности, которое будет записано в следующем виде:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \alpha \Delta \theta + F / c\rho,$$

где  $d\theta/d\tau = v_1 \partial \theta / \partial x_1 + v_2 \partial \theta / \partial x_2$

Запишем граничные условия:

$$V_1|_{s_1} = V^*, \quad V_2|_{s_1} = 0, \quad \sigma_{22}|_{s_1} = 0, \quad \sigma_{21}|_{s_1} = 0, \quad \sigma_{23}|_{s_1} = 0$$

$$\sigma_{12}|_s = 0, \quad i=3,4; \quad \sigma_{11}|_s = 0, \quad \sigma_{13}|_s = 0 \quad i=3,4.$$

Примем закон трения на контактных поверхностях  $S_1, S_3$ :

$$\sigma_{21}|_s = -\psi \tau_s \frac{v_{ck}}{|v^*|} \cos(n, x_2), \quad \sigma_{23}|_s = -\psi \tau_s \frac{(v_{ck})_3}{|v^*|} \cos(n, x_2)$$

где  $(v_{ck})_i$  - скорость скольжения материала трубной заготовки относительно пуансона в направлении оси  $x_i$  ( $i=1,3$ ),  $n$  - нормаль к поверхности контакта  $S_1$ ,  $\psi, \psi^*$  - коэффициенты трения,  $v^*$  - заданная скорость раздачи в направлении оси  $x_i$ ,  $v_3^* = \pi R n / 30$ ,  $R$  - текущий радиус  $R_0 \leq R \leq R_1$ .

Запишем температурные граничные условия:

$$\theta|_s = \theta^*,$$

$\theta^*$  - заданная температура.

$$q_n|_s = a_i (\theta_n - \theta_i^c), \quad i=1,2,3$$

$$q_n|_s = -\lambda \left( \frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_n; \quad i=1,2,3,$$

здесь  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $a_i$  - коэффициент теплообмена,  $\theta_i^c$  - температура охлаждающей среды на контактных поверхностях  $S_i$  ( $i=1,2,3$ ).

Был разработан алгоритм решения уравнения. Приведен алгоритм решения задачи. Проведены исследования процесса асимметричного обжима.

*Рассмотрим формообразование трубных заготовок ротационными методами.* Для этих случаев разработана математическая модель технологических процессов ротационного обжима и раздачи, основывающаяся на исходных уравнениях работ от внешних и внутренних сил, сил трения, интенсивности деформации, интенсивности напряжений, условия пластичности, уравнения равновесия.

Решим задачу симметричной ротационной раскатки трубчатых заготовок в следующей последовательности.

Условно разделим всю зону контакта инструмента и заготовки на 4 зоны:

- 1-ая зона - отставания; 2-ая зона - торможения; 3-я зона - ускорения; 4-ая зона опережения.

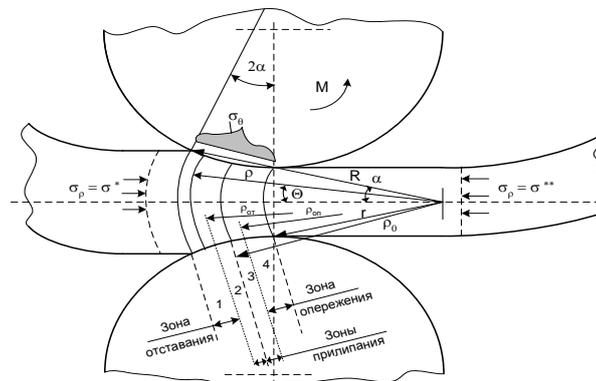


Рис. 4. Расчетная схема при симметричной раскатке для определения  $\sigma_\phi$

Исходя из предположений и допущений примем, что на зоны 1 и 4 распространяется закон Амонтона-Кулона, в зонах 2 и 3 контактное трение максимально.

Приведем систему уравнений для зоны отставания (рис. 5). Для данной задачи уравнение равновесия выглядит следующим образом:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{\mu}{\alpha} |\sigma_\theta| = 0.$$

Запишем в приближенном виде уравнение пластичности:

$$\sigma_s = \sigma_\rho - \sigma_\theta.$$

Запишем касательные напряжения, которые возникают от сил контактного трения:

$$\tau_x = \tau_{\rho\theta} = -\mu |\sigma_\theta|.$$

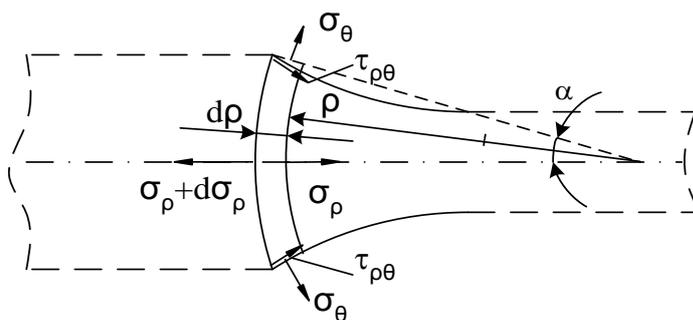


Рис. 5. Схема контактных давлений в зоне 1

Решим совместно уравнения, определим контактное давление  $\sigma_\theta$

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_s - \frac{\mu}{\alpha} |\sigma_\theta| = 0, \text{ где } |\sigma_\theta| = \sigma_s - \sigma_\rho$$

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_s}{\rho} - \frac{\mu}{\rho\alpha} (\sigma_s - \sigma_\rho) = 0.$$

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_s}{\rho} - \frac{\mu\sigma_s}{\rho\alpha} + \frac{\mu\sigma_\rho}{\rho\alpha} = 0.$$

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\mu\sigma_\rho}{\rho\alpha} = \frac{\sigma_s}{\rho} \left( \frac{\mu}{\alpha} - 1 \right).$$

Полученное выражение относится к дифференциальным уравнениям типа:

$y' + P(x)y = Q(x)$ , решение которого будет иметь вид:

$$y = \left[ \int dx Q(x) e^{\int P(x) dx} + C1 \right] e^{-\int P(x) dx}.$$

Из граничных условий определим C1:  $\sigma_\rho = \sigma^*$  при  $\rho = R$ . Получаем:

$$C1 = \sigma^* R^{\frac{\mu}{\alpha}} - \sigma_s \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) R^{\frac{\mu}{\alpha}}.$$

Подставим C1 в уравнение и получим

$$\sigma_\rho = \sigma_s \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) + \left[ \sigma^* R^{\frac{\mu}{\alpha}} - \sigma_s \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) R^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] \rho^{-\frac{\mu}{\alpha}};$$

$$\sigma_\rho = \sigma_s \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) + \sigma^* \left( \frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} - \sigma_s \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) \left( \frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}};$$

$$\sigma_\rho = \sigma_s \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) \left[ 1 - \left( \frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] + \sigma^* \left( \frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}}.$$

Из приближенного условия пластичности получим, что:

$$\sigma_\theta = \sigma_\rho - \sigma_s.$$

Воспользуемся уравнением и получим:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_s \left(1 - \frac{\alpha}{\mu}\right) \left[1 - \left(\frac{R}{\rho}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}\right] - \sigma_s + \sigma^* \left(\frac{R}{\rho}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}.$$

Проведя преобразования, приведем выражение к виду:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_s \left\{ \left(1 - \frac{\alpha}{\mu}\right) \left[1 - \left(\frac{R}{\rho}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}\right] - 1 \right\} + \sigma^* \left(\frac{R}{\rho}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}},$$

где  $\sigma_s = const$ ;  $\sigma^*$  - величина подпора со стороны входа края трубчатой заготовки в зону локальных деформаций.

Как уже было допущено выше, в зоне прилипания-торможения 2 принимаем, что величины контактного трения достигают максимальных значений (рис. 6). Приведем систему уравнения для данного случая.

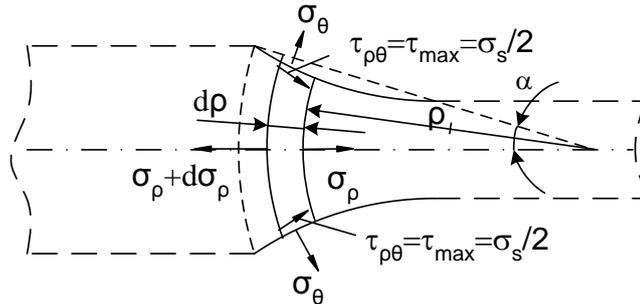


Рис. 6. Схема для расчета контактных давлений в зоне 2

Для данной задачи в зоне 2 уравнение равновесия выглядит следующим образом:

$$\rho \frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho} + \sigma_{\rho} - \sigma_{\theta} - \frac{\tau_{\max}}{\alpha} = 0.$$

Запишем условие пластичности:

$$\sigma_s = \sigma_{\rho} - \sigma_{\theta},$$

Условие было взято из условия  $(\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta})^2 + 4\tau_{\rho\theta}^2 = \sigma_s^2$ ,

если  $\tau_{\rho\theta} \rightarrow \tau_{\max} = \frac{\sigma_s}{2}$ .

имеем  $\rho \frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho} - \frac{\tau_{\max}}{\alpha} = 0$ , где  $\tau_{\max} = \frac{\sigma_s}{2}$ .

Окончательно запишем распределение радиальных напряжений в следующем виде

$$\sigma_{\rho} = -\frac{\sigma_s}{2\alpha} \ln\left(\frac{\rho_{om}}{\rho}\right) + \sigma_{\rho_0},$$

Из условия следует  $\sigma_{\theta} = \sigma_{\rho}$  и, соответственно, определим величину контактных давлений:

$$\sigma_{\theta} = -\frac{\sigma_s}{2\alpha} \ln\left(\frac{\rho_{om}}{\rho}\right) + \sigma_{\rho_0},$$

где

$$\sigma_{\rho_0} = \sigma_s \left(1 - \frac{\alpha}{\mu}\right) \left[1 - \left(\frac{R}{\rho_{om}}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}\right] - \sigma_s + \sigma^* \left(\frac{R}{\rho_{om}}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}.$$

Для зоны прилипания-ускорения 3 (рис. 7) также принимаем, что величины контактного трения максимальны. Приведем систему уравнений для данного случая

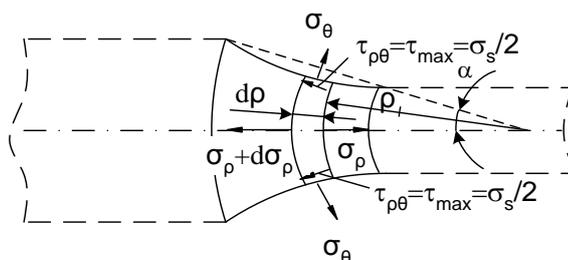


Рис. 7. Схема для расчет контактных давлений в зоне 3

Запишем уравнения равновесия:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta + \frac{\tau_{\max}}{\alpha} = 0,$$

где  $\tau_{\max} = \frac{\sigma_s}{2}$ .

Запишем условие пластичности, как для предыдущего случая:  $\sigma_\rho - \sigma_\theta = 0$ .

Из условия:  $\sigma_\theta = \sigma_\rho$  получим:

$$\sigma_\theta = -\frac{\sigma_s}{2\alpha} \ln\left(\frac{\rho}{\rho_{on}}\right) + \sigma_{\rho_{on}},$$

Где

$$\sigma_{\rho_{on}} = \sigma_s \left( \frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) \left[ 1 - \left( \frac{\rho_{on}}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - \sigma_s + \sigma^{**} \left( \frac{\rho_{on}}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}}$$

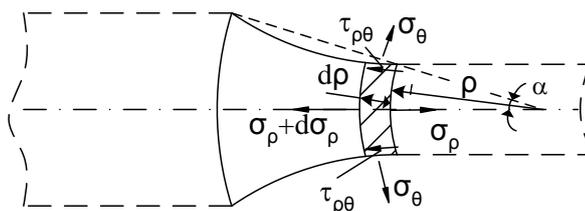


Рис. 8. Схема для расчета контактных давлений в зоне 4

Выведем систему уравнений для зоны опережения 4 (рис. 8)

Уравнение равновесия приобретает следующий вид:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{\mu}{\alpha} |\sigma_\theta| = 0.$$

Условие пластичности запишем в следующем виде:

$$\sigma_s = \sigma_\rho - \sigma_\theta.$$

Рассчитаем касательные напряжения:

$$\tau_k = \tau_{\rho\theta} = +\mu |\sigma_\theta|.$$

По аналогии с решением для зоны 1, решим совместно

$$\sigma_\rho = \sigma_s \left( \frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) + C1 \rho^{\frac{\mu}{\alpha}}.$$

Из граничных условий найдем постоянную C1:  $\sigma_\rho = \sigma^{**}$  при  $\rho = r$ . Получим:

$$\sigma^{**} = \sigma_s \left( \frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) + C1 r^{\frac{\mu}{\alpha}};$$

$$C1 = \sigma^{**} r^{-\frac{\mu}{\alpha}} - \sigma_s \left( \frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) r^{-\frac{\mu}{\alpha}}.$$

Окончательно получим:

$$\sigma_\rho = \sigma_s \left( \frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) \left[ 1 - \left( \frac{\rho}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] + \sigma^{**} \left( \frac{\rho}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}}.$$

Рассчитаем искомую величину  $\sigma_\theta$  для зоны 4 из условия пластичности:

$$\sigma_\theta = \sigma_s \left\{ \left( \frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) \left[ 1 - \left( \frac{\rho}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - 1 \right\} + \sigma^{**} \left( \frac{\rho}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}},$$

где  $\sigma_s = const$  (как средняя подинтегральная величина)  $\sigma^{**}$  - величина усилий со стороны подпора (область выхода заготовки из очага).

Таким образом, мы определили контактные давления в локальных зонах 1, 2, 3 и 4. Для указанных зон необходимо определить внутренние границы.

Если учесть, что в зонах 1 и 2 ( $\rho = \rho_{om}$ ) имеют место одинаковые условия контактного трения, получим, что  $|\sigma_\theta| \mu = \frac{\sigma_s}{2}$ . Для положительного  $\sigma_\theta$  имеем

$$\left| \sigma_s \left\{ \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) \left[ 1 - \left( \frac{R}{\rho_{om}} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - 1 \right\} + \sigma^{**} \left( \frac{R}{\rho_{om}} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right| \mu = \frac{\sigma_s}{2}$$

Для отрицательного значения  $\sigma_\theta$ :

$$\left\{ \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) \left[ 1 - \left( \frac{R}{\rho_{om}} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - 1 \right\} + \frac{\sigma^{**}}{\sigma_s} \left( \frac{R}{\rho_{om}} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} = \frac{-1}{2\mu}.$$

Рассчитаем соотношение радиусов зоны 1 из уравнения. Имеем следующее соотношение:

$$\left( \frac{R}{\rho_{om}} \right) = \left( \frac{1 - 2\alpha}{2\mu} \frac{\sigma^{**}}{\sigma_s} \right)^{\frac{\alpha}{\mu}}.$$

На основе модели был создан алгоритм процесса раскатки с учетом динамической схемы процесса пластической деформации и составлена компьютерная программа процесса на языке Си++. Разработана математическая модель расчета контактных давлений при симметричной ротационной раскатке трубных заготовок.

*Рассмотрим процесс формообразования эластичными и сыпучими средами.* Для этих случаев формообразования разработана математическая модель поведения сыпучей гранулированной среды в процессе нагружения, на основе которой разработан алгоритм определения констант модели для сыпучих гранулированных материалов. Разработан алгоритм расчета давления сыпучих наполнителей на стенки трубных заготовок.

Напряжения в сыпучих гранулированных средах не будут являться независимыми функциями деформаций, т.е не будут являться выпуклой функцией инварианта тензора деформаций. Зададим форму потенциала в следующем виде:

$$W = \frac{\lambda}{2} \left( I_1 - \sqrt{\frac{2\mu}{\lambda}} \sqrt{I_2} \right)^2,$$

здесь  $\lambda$  и  $\mu$  – константы материала,  $I_1 = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ ,  $I_2 = \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij}$ .

Для заданной формы потенциала будет верно равенство:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial I_1^2} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial (\sqrt{I_2})^2} - \left( \frac{\partial^2 W}{\partial I_1 \partial \sqrt{I_2}} \right) = 0,$$

исходя из которого можно получить тождественное соотношение для зависимости напряжений от деформаций

$$F(\sigma, \tau, \xi) \equiv \sigma - \frac{\frac{2}{3}\sqrt{\frac{\tau}{\lambda}}}{\sqrt{3(3-\xi^2)}} \tau = 0$$

$$\text{где } \xi = I_1 / \sqrt{I_2}, \quad |\xi| \leq 3, \quad \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}, \quad \tau = \sqrt{\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}} \quad (S_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha \delta_{ij}).$$

Для гранулированной среды связи напряжения с деформацией записываются в виде следующего уравнения:

$$\sigma_{ij} = \lambda \left( \xi - \sqrt{2 \frac{\mu}{\lambda}} \right) \left( \sqrt{I_2} \delta_{ij} - \sqrt{2 \frac{\mu}{\lambda}} \varepsilon_{ij} \right).$$

Данное уравнение может быть представлено в виде двух слагаемых. Первое будет связано с дополнительной работой, а второе будет зависеть от внутренних ограничений:

$$\varepsilon_{ij}^w = \frac{1}{\lambda + 2\mu} \left[ \frac{\alpha \delta_{ij}}{3 - \sqrt{\frac{2\mu}{\lambda}} \xi} + s_{ij} \right].$$

$$\varepsilon_{ij}^F = \frac{1}{\lambda + 2\mu} \frac{\sqrt{\frac{\lambda}{2\mu}} + \xi}{\sqrt{\frac{2\mu}{\lambda}} - \xi} \left[ \frac{2\mu}{\lambda} \frac{\alpha \delta_{ij}}{\sqrt{\frac{2\mu}{\lambda}} \xi - 3} + s_{ij} \right]$$

Сложив, мы получим следующее уравнение связи деформаций с напряжениями:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2\mu - \sqrt{2\mu\lambda}\xi} \left[ \frac{\sqrt{\frac{2\mu}{\lambda}} \xi}{\sqrt{\frac{2\mu}{\lambda}} \xi - 3} \alpha \delta_{ij} + s_{ij} \right]$$

Из уравнений можно сделать вывод, что при отношениях нормальных и касательных напряжений, по типу, близкому к

$$\frac{\sigma}{\tau} = \frac{\frac{1}{3} \kappa - \sqrt{1/\kappa}}{\sqrt{\frac{1}{2}(3 - \kappa^2)}}, \quad \left( \kappa = \frac{2\mu}{\lambda} \right)$$

При фиксированном значении  $\xi$  в пространстве главных напряжений участок поверхности будет поверхностью прямого кругового конуса. Вершина конуса будет в нуле, а ось будет перпендикулярна октаэдрической плоскости. Значение  $\xi$  будет определять угол раствора конуса  $\alpha$ .

$$\alpha(\xi) = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{\frac{1}{2}(3 - \xi^2)}}{\sqrt{\frac{\lambda}{2\mu} - \frac{1}{3}} \xi}$$

Зададимся перемещением точки напряженного состояния

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \delta \sigma_{ij} = 0, \quad F = 0$$

$$\frac{\tau}{\sigma} = \text{const}, \quad \xi = \text{const}, \quad \alpha(\xi) = \text{const}.$$

При этом угол раствора конуса остается неизменным, а точка эволюционирует по одной и той же образующей конуса. Подобная эволюция напряжений может считаться нейтральным нагружением.

В случае эволюции точки напряженного состояния

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \delta \sigma_{ij} > 0, \delta F = 0, F = 0$$

получим

$$\delta \left( \frac{\tau}{|\sigma|} \right) > 0, \delta \alpha > 0 \text{ при } \sigma < 0, \delta \xi > 0 \text{ при } \alpha(\xi) > 0.$$

Можно отметить, что в случае  $\sigma < 0$ , угол раствора конуса  $\alpha$  будет монотонно возрастать, и эта эволюция может быть обозначена как активное нагружение.

Следует отметить, что при связи  $F(\sigma, \tau, \xi) = 0$  поле напряжений в данной точке напряженного состояния будет обладать немаловажным экстремальным свойством: работа, которую совершают действительные напряжения по данному пути деформирования, всегда будет меньше или равна работе, которую могли бы совершить любые другие допустимые  $\sigma'_{ij}$  по тому же пути деформирования. Это свойство будет использовано в дальнейшем.

Участок поверхности внутреннего ограничения  $F(\sigma_{ij}, \xi) = 0$  может быть рассмотрен как поверхность нагружения для уравнения связи деформаций с напряжениями.

Определим траектории активного нагружения для гранулированного материала, для которых будут верны уравнения.

С этой целью найдем общее условие градиентального догружения. Это догружение или приращение напряжений для которого выполнено условие коллинеарности:

$$\begin{aligned} \delta \sigma_{ij} &= C \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (C > 0) \\ \delta \sigma_{ij} &= -\frac{J_2}{2\tau^2} \left( \frac{J_1 \sigma_{ij}}{J_2} - \delta_{ij} \right) \delta J_1 \\ &\quad (J_2 = \sigma_y \sigma_y, J_1 = \sigma_y \delta_y) \end{aligned}$$

Систему уравнений можно представить как равенство отношений в главных осях

$$\frac{\delta \sigma_i}{J_2 - J_1 \sigma_i} = \frac{\delta \sigma_j}{J_2 - J_1 \sigma_j} = \frac{\delta \sigma_k}{J_2 - J_1 \sigma_k}, \quad (i \neq j \neq k \neq i)$$

Найдем первый интеграл этой системы:

$$J_2 \equiv \sigma_y \sigma_y \equiv \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 = R_0^2 \quad (R_0 = const)$$

Таким образом, для предельной поверхности, представленной конусом разрушения Мизеса-Шлейхера, траектория градиентального нагружения будет расположена на поверхности сферы с радиусом  $R_0$  и начальной точкой  $(\sigma_1^0, \sigma_2^0, \sigma_3^0)$ , т.е.:

$$R_0^2 = \sigma_1^{02} + \sigma_2^{02} + \sigma_3^{02}$$

Найдем второй интеграл системы. Приведем полученное выражение к следующему виду:

$$\frac{\sigma_j - \sigma_i - 2\sigma_k}{\sigma_j - \sigma_k} = C, \quad (\sigma_i \geq \sigma_j \geq \sigma_k, C = const)$$

Исходя из вида, полученного первого и второго интеграла системы уравнений, можно сделать вывод, что траектория активного нагружения для гранулированного материала имеет вид дуги окружности. Это справедливо для случая нагружения, при котором второй инвариант  $J_2$  и угол вида напряженного состояния  $\chi_\sigma$  (параметр Лоде) не изменяются.

**Таким образом, во второй главе:** заданы исходные условия для формирования математических моделей для различных способов формообразования; разработаны математические модели и проведено численное решение задач для различных способов формообразования; разработаны алгоритмы для расчета процессов формообразования по жестким пуансонам, для ротационных процессов и с учетом применения эластичных и сыпучих сред; на основе алгоритмов разработаны компьютерные программы для расчетов процессов формообразования.

**В третьей главе** исследованы процессы раздачи концов трубных заготовок при различных способах деформирования. Построены реологические модели деформируемого металла. Проведены расчеты для определения технологических параметров различных способов формообразования.

Рассмотрены следующие способы деформирования: гибка-раздача по жесткому наборному пуансону; обжим и раздача по жесткому пуансону; ротационный обжим и раздача; обжим и раздача при помощи эластичных и эластосыпучих сред.

Для случая формообразования по жестким пуансонам исследованы напряженно деформированное состояние материала трубной заготовки на различных стадиях процесса.

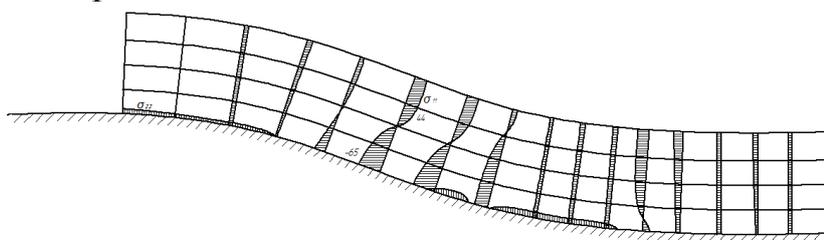


Рис. 9. Графические эпюры расчета трубной заготовки из 12X18H10T

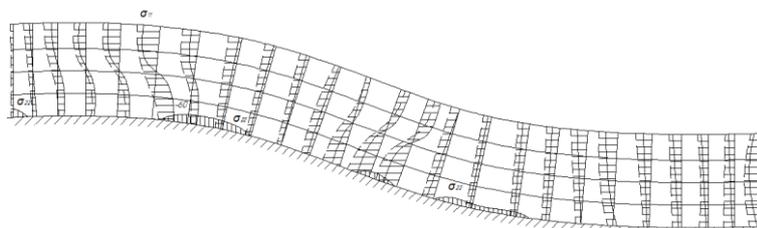


Рис. 10. Графические эпюры расчета трубной заготовки из 12X18H10T с учетом подпора

Приведены приближенные решения по определению полей напряженно-деформированного состояния материала деталей трубных заготовок. Рассмотрены

условия получения равнотолщинных деталей без потери устойчивости материала. Исследованы предельные возможности процесса деформирования.

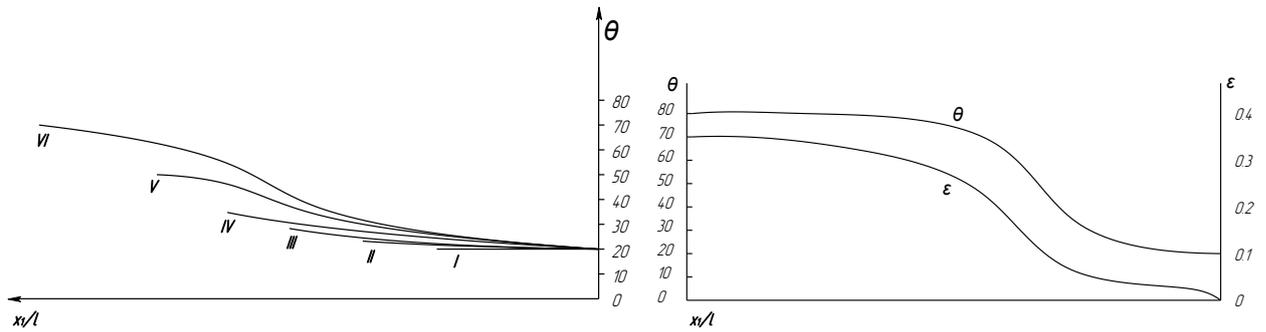


Рис. 11. Эволюции деформаций и температуры:  
а) эволюция по температуре в нестационарном режиме;  
б) зависимость температуры от деформации в стационарном режиме

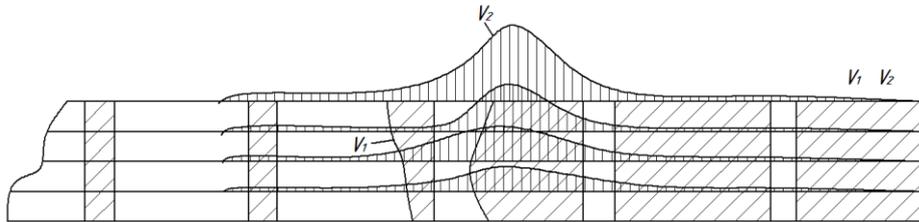


Рис. 12. Поля скоростей со стороны упорного кольца

Для случая ротационных процессов формообразования проведены исследования и получены выражения для определения силовых параметров процесса.

Процесс ротационного обжима осуществляется в следующей последовательности (рис. 13). Вращающаяся трубчатая заготовка 1 по оси подается в имеющийся профилированный зазор между оправкой 2 и давящим роликом 3. Вращение обеспечивается оправкой 2. Осевое перемещение происходит за счет отклонения оси вращения трубной заготовки от оси вращения оправки на угол  $\alpha$  (рис. 14).

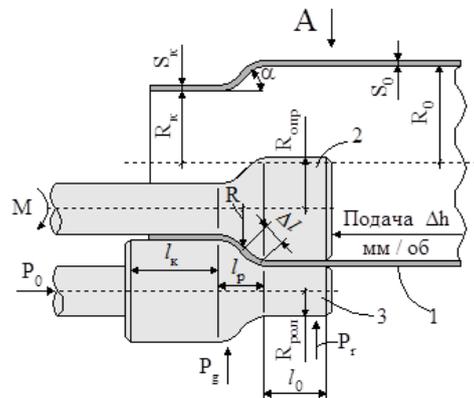


Рис. 13. Принципиальная схема процесса ротационного обжима труб:  
1 – трубная заготовка; 2 – ведущая оправка; 3 – давящий ролик

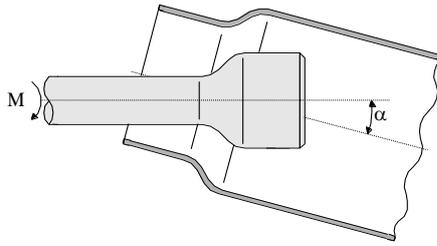


Рис. 14. Отклонения оси вращения трубчатой заготовки от оси вращения оправки на угол  $\alpha$  (вид А на рис. 1)

Под действием комплекса осевых и радиальных усилий происходит локальное деформирование концевой участка заготовки. В начале процесса деформирование происходит в нестационарном очаге деформации, который с течением времени переходит в стационарный.

Исключая потери на упругое деформирование стенки трубы от силы  $P$ , принимаем следующее допущение: работа от внешнего момента  $M\varphi$  полностью расходуется на обжим концевой участка трубы. Следовательно:

$$M\varphi = f(\sigma_s, \varepsilon_i, \Delta V),$$

где  $M\varphi$  - работа внешнего момента.

Из расчета на один оборот заготовки получим:

$$2\pi M = \sigma_s \varepsilon_i \Delta V,$$

где  $\Delta V = 2\pi R S \Delta h \exp(\varepsilon_m)$  - объем деформируемого материала заготовки (принимаем, что толщина стенки в очаге деформации  $S = S_0 - const$ ),  $R$  - радиус кромки заготовки, обеспечивается радиусами оправки,  $\Delta h$  - величина подачи заготовки на один оборот (в мм)  $\varepsilon_m = \ln(R_0/R)$ .

Преобразуем уравнение и получаем, что работа, приходящаяся на один оборот детали

$$M = \sigma_s \varepsilon_i R S \Delta h \exp(\varepsilon_m),$$

где  $\varepsilon_i = 1,15\varepsilon_m$ ,  $\sigma_s = \sigma_{\square} + n\varepsilon_i$ ,  $R = R_0 - \Delta h \sin \alpha \exp(\varepsilon_m)$ .

Проводим расчет работы внешнего момента за последующие обороты детали по уравнению и суммируем по формуле:

$$M_{i=N} = \sum_{i=1}^N M_i.$$

Здесь  $M_i$  - величины работы от внешнего момента);  $N$  - общее количество оборотов заготовки от  $i=1$  до  $i=N$ .

Скорость вращения заготовки определим из соотношения радиусов кромок оправки и заготовки и приведем к оборотам в секунду:

$$V_d = \frac{nR_{оп}}{R_0 60}.$$

где  $n$  - частота вращения оправки (об/мин).

Определим время, затраченное на обработку:

$$\tau = \frac{i}{V_d}.$$

Определим перемещение законцовки детали в зоне деформации, приходящееся на один оборот:

$$\Delta l = \Delta h \exp(\varepsilon_m).$$

Угол отклонения оси вращения трубчатой заготовки от оси вращения оправки рассчитаем по следующему выражению:

$$\alpha = \frac{360\Delta h}{4\pi^2 R_0} \text{ (градусы)}.$$

Определим смещение заготовки и инструмента в направлении  $x$  и  $y$  (рис. 15), получим:

$$x = \frac{0,5(R_0^2 - R^2)}{R_{\text{пол}} + R}; \quad y = \sqrt{R_0^2 - (R+x)^2}.$$

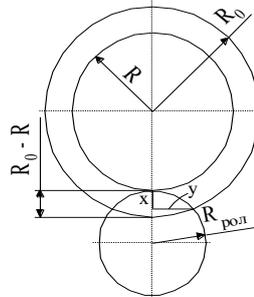


Рис. 15. Схема расчета смещений и определения площади контакта трубной заготовки и оправки (вид Б на рис. 1)

Также из рис. 15 определим площадь проекции контакта в осевом направлении.

$$F \approx y(R_0 - R).$$

Таким образом, площадь проекции контакта заготовки и инструмента по всему очагу деформации составит:

$$F_0 = \pi(R_0^2 - R^2).$$

Примем, что затраченная работа (усилие) на преодоление сил трения пропорциональна площади контакта. Исходя из допущения, рассчитаем осевое усилие  $P_0$ , действующее на ролик

$$P_0 = \frac{M_{\text{исN}} F \varphi}{F_0 l \cos \alpha},$$

где  $l$  – перемещение концевой части детали в очаге деформации;  $l = l + \Delta l$ ;  $\varphi$  – угол поворота детали;  $\varphi = 2\pi i$ .

Определим радиальное усилие:

$$P_d = P_0 \cos \alpha.$$

Определим усилие, возникающее в зоне упругого сжатия

$$P_r = l_0 d_k \sigma_{m_0},$$

где  $d_k = \sqrt{r_c^2 - h_c^2}$  – длина контакта оправки и трубной заготовки в зоне развития упругой деформации.

$$\text{Здесь } r_c = \frac{R_{\text{оп}} + R_{\text{пол}}}{2}, \quad h_c = r_c - 0,002S_0.$$

Проведение процесса деформирования возможно при условии, что:

$$P_0 \leq P_r 2f,$$

где  $f$  – коэффициент трения в зоне контакта оправки и заготовки.

Рассчитаем момент в зоне упругости:

$$M_r = P_r r_c.$$

Определим суммарную радиальную силу, путем сложения усилия в зоне контакта и радиального усилия. Таким образом, усилие на ролике будет равно:

$$P_{\Sigma} = P_d + P_r,$$

а суммарный крутящий момент определим путем сложения внешнего момента за все обороты и момента в зоне упругости:

$$M_{\Sigma} = M_{i=N} + M_r.$$

Определим мощность на оправке от суммарного крутящего момента с учетом общего количества оборотов:

$$W = \frac{M_{\Sigma} \varphi}{\tau}$$

Применяя коэффициент запаса  $k=1,5-2,0$  определим мощность двигателя.

Для случая формообразования при помощи эластичных и сыпучих сред проведено исследование процесса выдавливания эластичного наполнителя для различных случаев, в частности ниже показан один из случаев с односторонним нагружением:

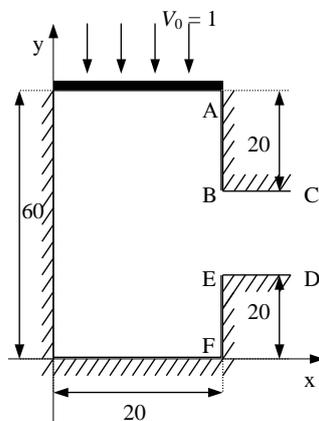


Рис. 16. Схема и размеры заготовки для исследования процесса выдавливания

Верхняя линия большой толщины обозначает штамп, а стрелки показывают направление движения. Примем  $V_0 = 1$ . Штриховкой показаны жесткие стенки.

Заготовка прямоугольная, при выдавливании появляется некий отросток BCDE, размеры которого и будут определять в дальнейшем все стадии деформирования.

Примем, что стенки и инструмент абсолютно шероховатые, т.е. возникает касательное напряжение, сопоставимое с  $\tau_s$ , а коэффициент Пуассона из формулы  $\tau = \mu \tau_s$  будет равен  $\mu = 1$ . Разобьем область на конечные элементы  $21 \times 20$  (рис. 17).

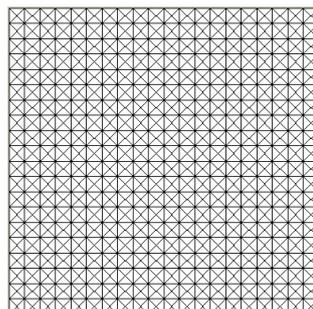


Рис. 17. Конечно-элементное разбиение

На рис. 18 показаны линии тока для отростка в нулевом положении. На рис. 26 показаны распределение компонент модуля скорости вдоль АВЕФ (рис. 16), здесь АВЕФ показана в горизонтальном расположении.

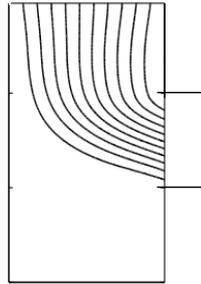


Рис. 18. Линии тока для нулевого отростка

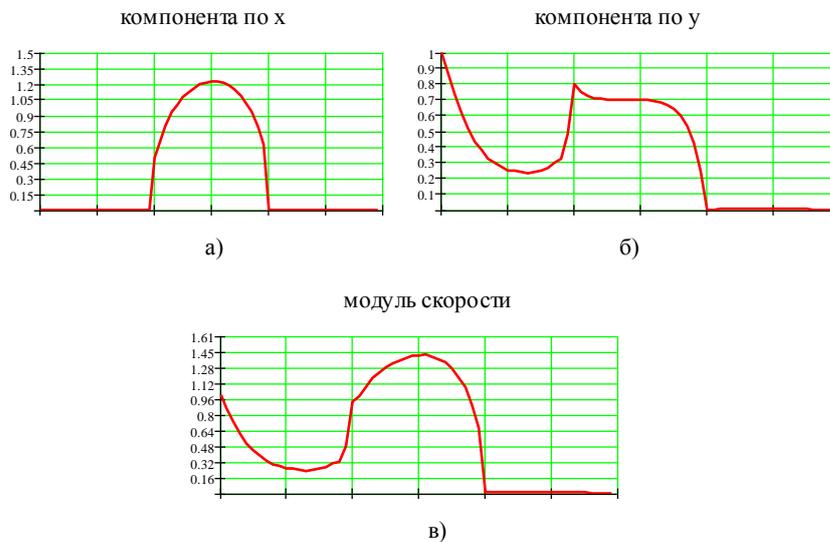


Рис. 19. Распределение компонент скорости по осям x и y, а также модуля скорости при течении среды вдоль границы АВЕФ

На основе проведенных исследований, была предложена математическая модель процесса формообразования концевых участков трубной заготовки с использованием метода ротационного обжима, которая позволяет автоматизировать отдельные этапы новых производственных процессов, связанных с силовыми параметрами подачи заготовок по оси и радиальных усилий, развиваемых на роликах. Были предложены новые методы оценки НДС в случае ротационной вытяжки и продольной прокатки, позволяющие сократить материальные и трудовые затраты на разработку новых технологических процессов и повысить качество деталей за счет снижения потери устойчивости и разрушения заготовок.

**Таким образом, в третьей главе:** с учетом поправочных данных исследовано влияние формы оснастки на конечный результат формообразования; исследовано распределение интенсивности деформаций и напряжений для процессов формообразования, предложены рекомендации по автоматизации отдельных режимов формообразования трубных заготовок; исследованы энергосиловые и кинематические процессы пластического течения материала трубных заготовок и эластосреды.

В четвертой главе приведено описание экспериментальных работ. Поставлены задачи экспериментальных исследований, приведены качественные и количественные характеристики рациональных технологических процессов формообразования деталей из трубных заготовок в зависимости от смазки, покрытий, схемы нагрева и др. Проводился следующий комплекс работ по экспериментальному подтверждению соответствия теоретическим разработкам: выбор оборудования и технологической оснастки; экспериментальные исследования процессов раскатки и ротационного обжима трубных заготовок; экспериментальные исследования процессов формообразования при помощи жестких матриц; экспериментальные исследования процессов формообразования при помощи эластичных и эластосыпучих сред; исследование физико-механических характеристик элементов пневмогидросистем; исследование макро- и микроструктуры на основе металлографических исследований с рекомендациями по предельным возможностям процессов; испытания на прочность, герметичность, вибропрочность, исследование предельных возможностей процессов.

В случае формообразования по жестким пуансонам были приведены описания экспериментов симметричного и асимметричного обжима и раздачи с нагревом и без нагрева, гибка-раздача с нагревом, формовка трубной заготовки.

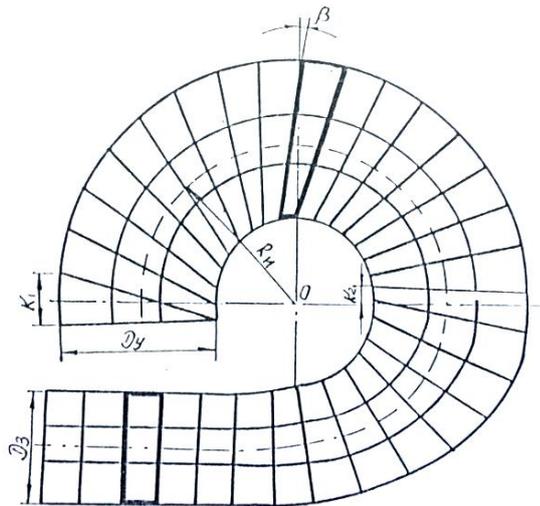


Рис. 20. Деформация сетки при гибке-раздаче по рогаобразному сердечнику

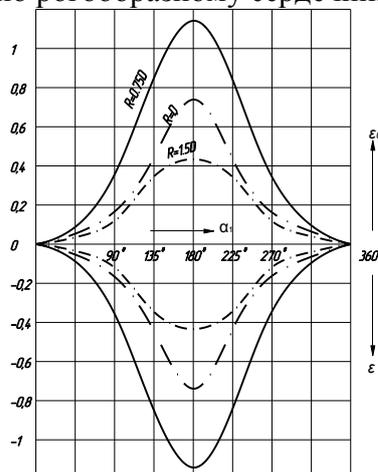


Рис. 21. Распределение истинных деформаций в зависимости от угла и радиуса изгиба.



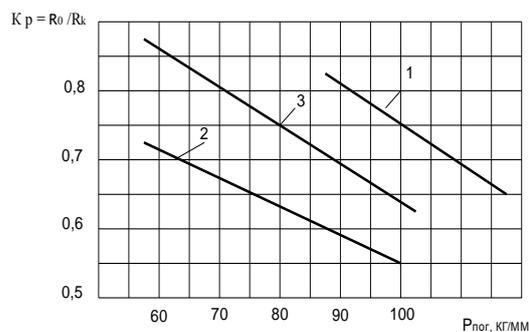


Рис. 25. Графики зависимости коэффициента раскатки трубной заготовки от погонных усилий: 1- Ст.3,  $\varnothing$  60 мм; 2 – Ст.3,  $\varnothing$  42,4 мм; 3 - АМГ6,  $\varnothing$  50 мм

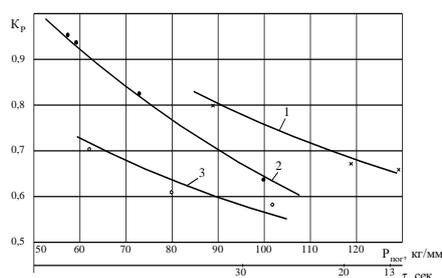


Рис. 26. Зависимость коэффициента обжима  $K_{об}$  при обжиге трубной заготовки от усилия на давальном ролике  $P_{ног}$  и времени обработки  $\tau$  (для трубы  $\varnothing$  60x3.5): 1 - труба сталь Ст.3  $\varnothing$  60x3.5 мм; 2 - труба сталь Ст.3  $\varnothing$  42.4x3.5 мм; 3 - труба АМГ6М  $\varnothing$  50x2.25 мм.

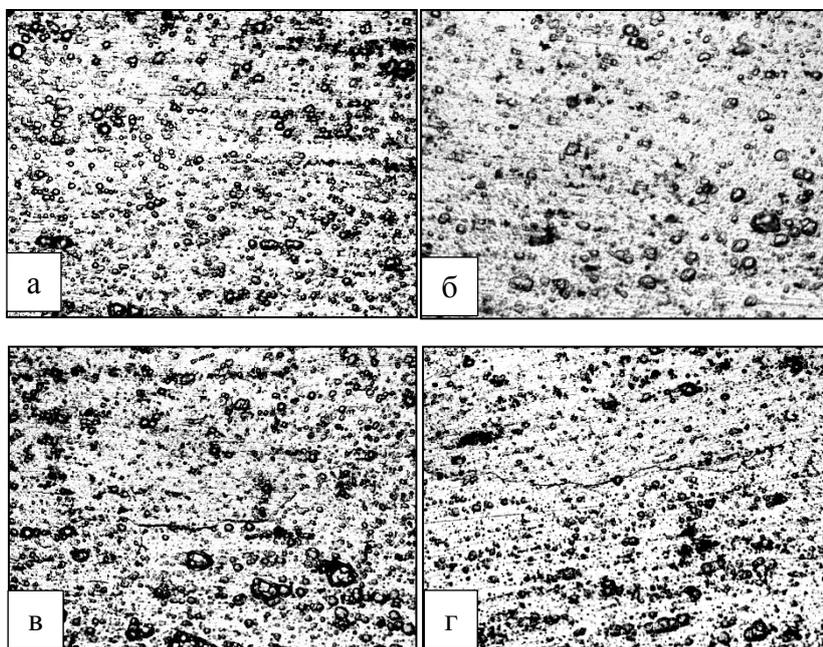


Рис. 27. Микроструктуры сечений конического фрагмента трубы из Д16Т, полученной раскаткой. а – исходная структура; б –  $\epsilon = 0,2$ ; в –  $\epsilon = 0,9$ ; г –  $\epsilon = 0,16$

Для формообразования трубных заготовок эластичными и сыпучими средами были определены задачи и содержание исследований, произведен выбор технологического оборудования. Получены качественные показатели деталей, изготовленных с помощью эластичных и сыпучих тел, сделан вывод о влиянии

местного нагрева, конструкции пуансона, подобранной смазки и подготовленной к деформации трубной заготовки на качественные составляющие процесса. Был получен анализ микроструктуры образцов и проведены прочностные испытания, показавшие повышение качества готового изделия.



Рис. 28. Детали, отформованные эластично-сыпучей средой:  
а) с нагревом, б) холодное деформирование

**Таким образом, в четвертой главе:** произведен выбор экспериментального оборудования; проведена серия экспериментов по формообразованию трубной заготовки по жестким пуансонам, с помощью ротационных процессов, с помощью эластосыпучих сред; установлены основные зависимости конечного состояния деталей от исходных данных технологических процессов и физико-механических характеристик; проведены прочностные исследования, испытания на вибропрочность, анализ микроструктуры, испытания на герметичность всех типов полученных деталей.

**В пятой главе,** на основе комплексных качественных характеристик, отражающих удобство производства технических объектов, ремонтпригодность и эксплуатационные качества **были разработаны рекомендации** к выбору наиболее рациональных схем проектирования, конструирования и производства трубных изделий для ЛА, а именно:

- рекомендации по выбору рациональной схемы формообразования концов трубной заготовки при помощи сборно-разборного пуансона;
- рекомендации по использованию сборно-разъемной конструкции пуансона, каждая часть которого выполнена из отдельного материала и обладают различной степенью магнитной проницаемости и способности нагреваться в высокочастотном поле, за счет чего можно производить раздачу труб различных форм и размеров при изменении геометрии и степени нагрева;
- рекомендации по выбору рациональной схемы гибки-раздачи труб, за счет использования специальной установки по стыковке трубных заготовок, подготовке трубной заготовки обрезкой под скос, зачисткой и оксидированием;
- рекомендации по использованию методики проектирования рогообразных сердечников, состоящих из разных частей, выполненных из металлов с разной магнитной проницаемостью;
- рекомендации по подготовке готовых изделий к соединению, которые заключаются в выносе зоны сварного шва в зону магистрального трубопровода;

- рекомендации по моделированию формообразования тройников с использованием эластичной среды в специализированных программных комплексах;

- рекомендации по моделированию процессов раздачи в полость жесткой матрицы при помощи эластичной среды, включающие в себя выбор конечного элемента, констант соотношения Муни-Ривлина, коэффициентов трения для смазки и без смазки;

- рекомендации по моделированию формообразования концов трубных заготовок с применением эластосыпучей среды с учетом предотвращения потери устойчивости стенок заготовки;

- рекомендации к определению контактных давлений при ротационном обжиме и раскатке трубных заготовок;

- рекомендации к определению крутящих моментов в случае использования оправок равного и различного диаметров;

- рекомендации к расчетам для определения работы сил контактного трения для осесимметричной задачи;

- рекомендации в виде блок-схемы для процессов изготовления деталей из трубных заготовок с учетом степени деформации, нагрева, силовых и кинематических характеристик;

- рекомендации по созданию установки воздействия мощных импульсов тока при формообразовании деталей из титановых сплавов;

- рекомендации в виде методики расчета энергии, поступающей в трубную заготовку за единицу времени, методики по расчету длительности импульсов тока, по определению физического подобия трубных заготовок и эквивалентных им образцов с учетом электрических параметров, по определению энергетических режимов электроимпульсной обработки, определению мощности источников питания.

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

1. На основе проведенного анализа изготовления деталей трубопроводов ЛА, влияния способов и методов предварительной обработки, анализа предельных возможностей процессов формообразования трубных заготовок различными способами проведена математическая постановка задачи построения математических моделей формообразования деталей из трубных заготовок и были разработаны: математическая модель процесса формообразования трубных заготовок по жестким пуансонам; математическая модель ротационных процессов формоизменения трубных заготовок на основе сил трения, интенсивности деформаций и напряжений; математическая модель расчета контактных давлений при симметричной ротационной раскатке трубных заготовок; математическая модель поведения сыпучей гранулированной среды в процессе нагружения.

2. Впервые получены результаты экспериментальных исследований, на основании которых произведено уточнение рациональных параметров технологических процессов производства деталей трубопроводов ЛА и разработаны следующие методики и алгоритмы расчетов: методика расчета

технологических процессов обжима, раздачи, гибки-раздачи по жестким пуансонам, позволяющие получать готовые детали с утонениями менее 20%, коэффициентом раздачи и обжима более 2, с эллипсностью и спиралевидностью не превышающими допустимые ограничения по ТУ; алгоритм расчета кинематической модели процесса раскатки с учетом динамической схемы процесса пластической деформации, позволяющие получать готовые детали с предельными деформациями на 30...40% выше по сравнению с традиционными схемами; алгоритм расчета ротационного обжима с учетом исходных и конечных данных по материалу трубной заготовки; алгоритм определения констант модели для сыпучих гранулированных материалов; алгоритм расчета давления сыпучих наполнителей на стенки трубных заготовок, с учетом местного нагрева и предварительной подготовки трубной заготовки, позволяющий получать готовые детали с лучшими показателями по толщине стенки на 10...12%.

3. Проведенные исследования по поиску наиболее рациональных параметров технологических процессов производства трубных деталей для ЛА позволили: расширить диапазон температурных условий проведения процессов для стальных и титановых сплавов до 950 °С; определить влияние геометрии инструмента (радиусы скруглений вогнутой и выпуклой частей сердечника, диаметры давилных оправок и роликов), режимов смазки (с нагревом и без), силовых воздействий на вероятность разрушения деталей при различных режимах деформирования; определить влияние силовых и моментных характеристик на качественные показатели готового изделия в ротационных процессах (отсутствие эллипсности, спиралевидности, козырьков, потери устойчивости стенок) ; определить влияние эластичной среды на проведение процессов формообразования при различных режимах силового и температурного воздействия.

4. На основе комплекса теоретических и экспериментальных работ были разработаны рекомендации по выбору наиболее рациональных схем производства деталей ЛА с учетом технологичности, а именно: рекомендации по совместному использованию наиболее оптимальных сочетаний конструкций пуансона, режимов смазки и нагрева при формообразовании по жестким пуансонам; рекомендации по температурной интенсификации в высокочастотном поле; рекомендации по проектированию технологической оснастки; рекомендации по подготовке деталей трубопроводов к соединению; рекомендации по моделированию процессов формообразования трубных деталей в конечно-элементной среде, выбору конечного элемента и констант Муни-Ривлина; рекомендации по определению контактных давлений, крутящих моментов и сил контактного трения в ротационных процессах формообразования трубных заготовок.

5. Разработаны рекомендации по использованию технологических процессов в опытном и серийном производстве ЛА, а именно: разработана схема типового комплексно-механизированного участка по изготовлению различного типа деталей типа крутоизогнутых патрубков, раструбов, фланцев, переходников тройников; разработана карта типового технологического процесса; разработана типовая схема установки воздействия мощных импульсов тока при

формообразовании деталей ЛА из стальных и титановых сплавов; разработаны методики расчета энергии, определения электрических параметров эквивалентных образцов при испытаниях, определения энергетических режимов электроимпульсной обработки и определения мощности источников питания.

6. Впервые установлено, что на основе проведенных испытаний и с учетом вышеприведенных рекомендаций можно получать трубные элементы ЛА с коэффициентом обжатия более 2 раз, без утонения стенки, снизить разброс толщин по радиусу до 5%, довести эллипсность и спиралевидность до приемлемых ограничений по ТУ; повысить степень интенсификации процесса формообразования за счет совмещения в одном процессе силового воздействия и термообработки; повысить предел прочности и текучести готовых деталей на 10-15%; повысить малоцикловую усталость в 2-4 раза; повысить предельные возможности процесса раскатки на 30-40% по сравнению с традиционными; снизить крутящие моменты от внешних сил при проведении ротационных процессов формообразования; снизить утонения стенок трубных заготовок при формообразовании тройников эластичными средами на 10-12%, при одновременном увеличении пределов текучести и прочности.

7. Результаты работы внедрены на ряде предприятий авиационной промышленности, в частности в ЗАО «Санкт-Петербургская авиаремонтная компания» и ООО НПО «АэроВолга». Данные предприятия подтверждают своими актами о внедрении, что разработанные процессы ротационного обжима труб в 1,2-1,5 раза повышают предельные возможности процесса по сравнению с обжимом на матрице, а также, что разработанные оптимальные режимы обработки позволяют повысить качественные характеристики деталей (снижение потери устойчивости стенок, уменьшение шероховатости внутренних поверхностей, снижение эллипсности, спиралевидности и др.) и обеспечить большую степень формоизменения (более 2 раз) трубных заготовок.

### **Публикации по теме диссертации**

#### **Статьи в журналах из перечня ВАК**

1. Хейн Вин Зо. Изготовление трубных конструкций высокой надежности для летательных аппаратов / Хейн Вин Зо, С.Б. Марьин, Д.Г. Колыхалов // Авиационная промышленность. № 3 – 2015. С. 31-34.

2. Хейн Вин Зо. Исследование контактных давлений при симметричной ротационной раскатке трубчатых заготовок / Хейн Вин Зо// Ученые записки КнАГТУ. Науки о природе и технике. № IV-1 (24) 2015. С.4-10.

3. Хейн Вин Зо. Моделирование процесса ротационного обжима труб для производства деталей летательных аппаратов / Хейн Вин Зо// Ученые записки КнАГТУ. Науки о природе и технике. № III-1 (23) 2015. С.4-8.

4. Хейн Вин Зо. Анализ процессов и интенсификация изготовления деталей летательных аппаратов методом обжима и раздачи трубных заготовок / Хейн Вин Зо// Ученые записки КнАГТУ. Науки о природе и технике. № II-1 (22) 2015. С.13-19.

5. Хейн Вин Зо. Расчет силовых параметров при раскатке труб // Хейн Вин Зо, А.С. Чумадин, Л.П. Логунов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением- № 1, 2012. С. 3-8.:

6. Хейн Вин Зо. Экспериментальные исследования процесса раскатки труб / Хейн Вин Зо // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением- № 12, 2007. С. 5-8.

7. Хейн Вин Зо. Экспериментальные исследования ротационного обжима труб в производстве деталей летательных аппаратов /Хейн Вин Зо // Фундаментальные исследования. №12 часть (8) 2014. С.1959-1963.:

8. Хейн Вин Зо. Теоретические и экспериментальные исследования момента внешних сил при раскатке труб /Хейн Вин Зо // Фундаментальные исследования №9 часть (9) 2014. С. 1959-1963.:

9. Хейн Вин Зо. Исследование напряженно-деформированного состояния материала в очаге деформации при раскатке труб /Хейн Вин Зо // Фундаментальные исследования. №6 часть (4) 2014. С. 733-738.:

10. Хейн Вин Зо. Исследование раскатки труб с помощью давящего кольца /Хейн Вин Зо // Фундаментальные исследования. №6 часть (3) 2014. С. 499-502.:

11. Хейн Вин Зо. Моделирование процесса раскатки труб для производства деталей летательных аппаратов /Хейн Вин Зо // Фундаментальные исследования. №6 часть (2) 2014. С.260-264.

12. Хейн Вин Зо. Теоретические исследования контактных давлений в очаге деформации при раскатке труб /Хейн Вин Зо // Науковедение: электронное научно-техническое издание, Выпуск 1 - 2014 (20) - январь – февраль, идентификационный номер статьи в журнале: 87TVN114.

13. Хейн Вин Зо. Экспериментальные исследования механических свойств материалов при раскатке труб /Хейн Вин Зо // Науковедение: электронное научно-техническое издание Выпуск 6 - 2013 (19) - ноябрь – декабрь, идентификационный номер статьи в журнале: 191TVN613.

14. Хейн Вин Зо. Математическое моделирование процесса ротационного обжима концевой части трубы /Хейн Вин Зо // Науковедение: электронное научно-техническое издание. Выпуск 6 - 2013 (19) - ноябрь – декабрь, идентификационный номер статьи в журнале: 62TVN613.

15. Хейн Вин Зо. Теоретические и экспериментальные исследования процесса раскатки концевых участков длинномерных трубчатых заготовок /Хейн Вин Зо // Науковедение: электронное научно-техническое издание, Выпуск 5 - 2013 (18) - сентябрь–октябрь. Идентификационный номер статьи в журнале: 68TVN513

16. Хейн Вин Зо. Раскатка труб для производства трубопроводных систем летательного аппарата /Хейн Вин Зо // Научное обозрение. № 9, 2014. С.403-408.

#### Другие публикации

17. Хейн Вин Зо. Экспериментальные исследования механических свойств материалов /Хейн Вин Зо// Научные труды МАТИ. Выпуск 23 (95), 2014.

18. Хейн Вин Зо. Расчет силовых параметров при ротационном обжиге труб /Хейн Вин Зо, А.С. Чумадин // Научные труды МАТИ. Выпуск 20 (92) 2013. С.182-185.

19. Хейн Вин Зо. Экспериментальные исследования по раскатке труб /Хейн Вин Зо, А.С. Чумадин // Научные труды МАТИ. Выпуск 18 (90) 2011. С. 101-106.

20. Хейн Вин Зо. Экспериментальные исследования процесса раскатки и обжима концевых участков труб /Хейн Вин Зо// Научная перспектива. 10(44).2013.

21. Хейн Вин Зо. Экспериментальные исследования момента внешних сил при ротационном обжиге труб / Хейн Вин Зо //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 Международ. научн-техн. конф. и Междунар. молодежной школы-семинара, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 мая 2015 г. / редкол: С.И. Феокистов (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015. – 205 с. ISBN 978-5-7765-1128-8/

22. Хейн Вин Зо. Сопоставление результатов опытных и теоретических работ при раскатке труб /Хейн Вин Зо// XXXV Гагаринские чтения, Международная молодежная научная конференция. Научные труды в 8 томах (Том-2), 2009.

23. Хейн Вин Зо. Особенности процесса раскатки труб /Хейн Вин Зо// XXXIII Академические чтения по космонавтике. Москва, январь-февраль, 2009. С.533.

24. Хейн Вин Зо. Особенности при раскатке /Хейн Вин Зо// XXXIV Гагаринские чтения Международная молодежная научная конференция, научные труды в 8 томах (Том-2), 2008. С. 34.

25. Хейн Вин Зо. Расчеты напряженного состояния при раскатке труб /Хейн Вин Зо// Всероссийская научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии». Секция № 3.1, 2008. С.64.

26. Хейн Вин Зо. Исследования процесса раскатки труб /Хейн Вин Зо// XXXII Академические чтения по космонавтике. Москва, январь-февраль, 2008. С.503.

27. Хейн Вин Зо. Поддерживающее устройство для ротационно-давилного станка /Хейн Вин Зо// XXXIII Гагаринские чтения, Международная молодежная научная конференция. Научные труды в 8 томах (Том-2), 2007. С. 35-36.:

28. Хейн Вин Зо. Трубопроводные системы в производстве летательных аппаратов. XXXIII Гагаринские чтения, Международная молодежная научная конференция научные труды в 8 томах (Том-2), 2007.С. 34-35.

29. Хейн Вин Зо. Раскатка концевых участков труб. / Хейн Вин Зо, А.С. Чумадин, М.В. Бондаренко //Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии». Москва, 21-23 ноября 2006 г. В 3 томах. Т2 –М.: ИЦ МАТИ, 2006г, с.46-47.