

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский – на – Амуре государственный
технический университет»

На правах рукописи

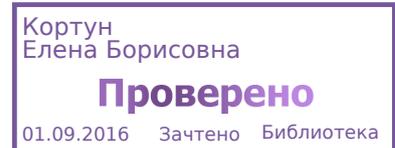
Старцев Сергей Владимирович

**Исследование технологии изготовления
трубопроводных систем для летательных аппаратов**

Направление 15.04.01 – «Машиностроение»

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
на соискание академической степени магистра

2016



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Создание новых летательных аппаратов требует постоянного совершенствования технологических процессов, обеспечивающих постоянно растущие требования по качеству и эксплуатационной надежности изделия.

Технологии изготовления деталей и узлов во многом определяют ресурс изделия, его трудоемкость и себестоимость, стабильность и культуру производства. При этом актуальной проблемой заготовительно-штамповочного производства является изготовление высокоресурных, надёжных трубопроводов (рис.1).

Трубопроводы работают в условиях сложного нагружения. Они испытывают действия высоких давлений, пульсирующей нагрузки и гидравлических ударов, поэтому к ним предъявляются высокие требования по механическим свойствам материала, качеству внешней и внутренней поверхностей, сохранению формы сечения, минимальных утонений стенок.

Наибольшее число разрушений трубопроводов связано с утонением их стенок в местах изгиба и перехода от одного диаметра к другому. Значительно снижают работоспособность такие факторы, как чрезмерная эллипсность и волнистость стенок – явления, сопровождающие процессы изготовления трубопроводов.

К элементам трубопроводных систем относятся патрубки, фитинги, тройники, переходники и др., почти все они производятся с помощью операций гибки, формовки, раздачи, обжима и др. из трубных заготовок. При этом в качестве рабочего инструмента (пуансона), деформирующего трубу, могут быть использованы жёсткие штампы или различные типы сред (жидкостные, газообразные, эластичные и сыпучие).

В настоящее время существенным образом меняются не только конфигурации трубопроводных систем, но и наблюдается устойчивая тенденция в применении всё более стойких и прочных материалов – титановых сплавов и высоколегированных сталей, которые обладают высокими характеристиками удельной и усталостной прочности, высокой коррозионной стойкостью, что делает их незаменимым материалом в трубопроводах находящихся под высоким давлением, различных типов жидкостей или газов.

Традиционные способы изготовления деталей из высокопрочных материалов обладают низкой эффективностью в силу присущих этим материалам технологических свойств: узкого диапазона пластического деформирования, низкой пластичности при комнатной температуре, высоких остаточных напряжений, возникающих в процессе деформирования. Повышение пластичности этих материалов возможно при введении в заготовку дополнительной энергии (электротермической, электроимпульсной и др.).

В связи с этим представленные в диссертации разработки схем процессов, методики расчётов, математические модели и экспериментальные исследования, обеспечивающие совершенствование технологии изготовления элементов трубопроводных систем летательных аппаратов, являются весьма актуальными.

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

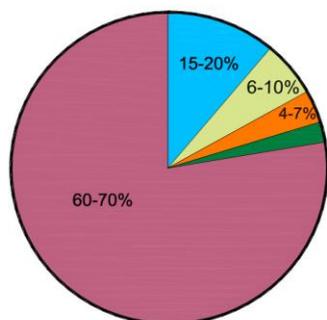


Су-35 – истребитель поколения «4++»



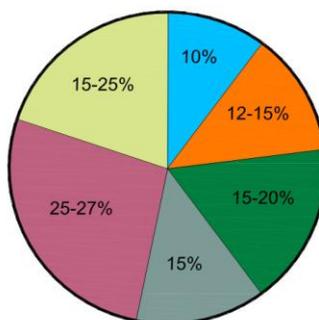
ПАК-ФА (Т-50) – истребитель пятого поколения

Объем штампованных деталей в конструкции ЛА (по ном.)



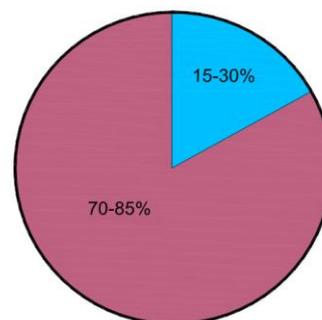
- - трубы;
- - листы, профили;
- - неметаллы;
- - горячая объемная штамповка;
- - прочие.

Трудоемкость изготовления деталей планера ЛА



- - трубопроводы;
- - из прессованных профилей;
- - обшивки;
- - нервюры, стенки, диафрагмы;
- - двери, люки, окантовки;
- - прочие.

Аварии и катастрофы ЛА



- - по вине разрушений трубопроводов;
- - прочие причины.

Рост трудоемкости штамповки деталей трубопроводов, (в усл. ед)

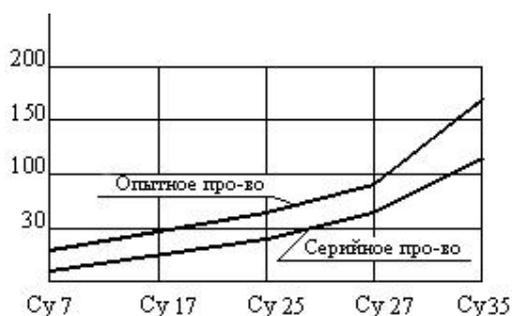


Рис. 1. Анализ надежности и эффективности изготовления элементов трубопроводных систем самолётов семейства «Сухой»

Объектом исследования являются детали трубопроводных систем летательных аппаратов.

Предметом исследования является способы и методы расчета процессов изготовления деталей трубопроводных систем летательных аппаратов.

Целью исследования является сокращение сроков технологической подготовки производства и трудоемкости изготовления деталей трубопроводных систем летательных аппаратов.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

- проведен анализ способов изготовления деталей и методов расчета технологических параметров;
- разработан метод расчета интенсифицированных процессов изготовления деталей трубопроводов;
- выполнена экспериментальная проверка полученных теоретических решений;
- разработаны и исследованы новые способы изготовления деталей трубопроводов;

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния при изготовлении деталей трубопроводных систем летательных аппаратов;
- намечены и исследованы пути интенсификации процессов изготовления деталей трубопроводных систем;
- разработана методика для обоснования выбора схемы деформирования определения оптимальных технологических параметров исследуемых процессов.

Методы и средства исследования.

Основные положения работы базируются на научных принципах системного анализа, классических трудах теории обработки металлов давлением, теории упругости, теории и технологии штамповки эластомерами.

Результаты и выводы по работе подтверждаются большим объёмом теоретических и опытно-экспериментальных работ, а также практическим использованием полученных результатов в производстве деталей самолётов разных типов.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- предложены способы деформирования заготовок и рекомендации по разработке перспективной штамповой оснастки, обеспечивающие сокращение сроков технологической подготовки производства и трудоемкости изготовления деталей.
- разработанные программы расчета процесса деформирования трубных заготовок на ЭВМ могут быть использованы для обоснования выбора схемы и режимов, что сокращает сроки технологической подготовки.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертации подтверждается использованием известных методик планирования экспериментов и проведения теоретических и экспериментальных исследова-

ний, современной вычислительной техники и программных средств для анализа и обработки данных эксперимента, проведением экспериментальных исследований с применением современного оборудования. Расхождение теоретических и экспериментальных данных составило порядка 15-20 %.

Личный вклад автора состоит в разработке концепции работы и постановке задач аналитических и экспериментальных исследований. Автором самостоятельно проводились теоретические и экспериментальные исследования с последующим анализом и обработкой полученных данных. Разработаны новые способы деформирования заготовок и конструкции устройств для их реализации. При личном и непосредственном участии автора разработаны рекомендации по применению разработанных новых способов и устройств деформирования в промышленности.

Вместе с тем автор считает своим долгом выразить искреннюю признательность научным консультантам Одинокovu В.И., Марьину Б.Н., Шпорту Р. В. за консультации при выполнении данной диссертационной работы.

Реализация теоретических и практических результатов работы.

Разработка практических мероприятий и рекомендаций, направленных на изготовление деталей из трубчатых заготовок различной формы из алюминиевых и титановых сплавов, а также коррозионностойких сталей. Эти разработки охватывают вопросы анализа номенклатуры деталей из трубчатых заготовок, выбор деталей, расчёт и проектирование технологических процессов, оснастки, приспособлений, проектирования и механизации участков изготовления деталей. Рассмотрены практически все операции изготовления деталей из трубчатых заготовок взамен традиционных методов изготовления полупатрубок, ручной их доводки и последующей сварки в опытном и серийном производствах.

Апробация работы. Основные результаты работы отражены в 10 публикациях, в том числе в 8 статьях, в патенте на полезную модель и одном тезисе докладов на международной научно-технической конференции.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, общих выводов, списка литературы. Полный объем работы составляет страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении на основе анализа научно-технических работ, посвящённых вопросам изготовления элементов гидрогазовых систем, обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель и методы её достижения, научная новизна и практическая значимость, апробация работы и публикации. Кратко излагается содержание работы по разделам.

В первой главе выполнен сравнительный анализ патентной и научно-технической литературы по существующим способам деформирования трубчатых заготовок (ТЗ).

Конструктивно-технологический анализ (рис. 2) показал, что элементы трубопроводов выполнены в виде тройников, законцовок, крутоизогнутых патрубков, муфт, переходников, фитингов, фланцев диаметрами от 6 до 100 мм, радиусом изгиба равным 0,5 диаметра патрубка, соотношением одного диаметра

к другому до 2 раз. Кроме того, необходимо добавить, что изготовление представленных деталей производится из трубных заготовок, толщиной стенки от 0,5 до 2,5 мм.

Значительный вклад в современную технологию авиаракетостроения, а также в разработку теории процессов деформирования ТЗ и методов их интенсификации внесли работы Абдулаева Ф. С., Барвинка В. А., Богоявленского К. Н., Братухина А. Г., Вагина В. А., Генина Е. В., Глазкова В. И., Горбунова М. Н., Давыдова О. Ю., Дмитриева А. М., Егорова В. Г., Ершова В. И., Исаченкова Е. И., Кирилина А. Н., Кобышева А. Н., Комарова А. Д., Костышева В. А., Лукьянова В. П., Масленникова Н. А., Моисеева В. К., Новожилова Г. В., Попова Е. А., Попова О. В., Рузанова Ф. И., Сироткина О. С., Сухомлинова Л. Г., Ходырева В. А., Чудакова П. Д., Чумадина А. С., Шатеева В. П., Швецова А. П., Энгельсберга В. К., Яковлевой О. Б., Al-Qureshi H. A., Mellor P. V., Garber S., Iseki H., Murata T., Kim Y. Z., Jony D.Y., Duncan J. L. и др.

Результаты этих работ позволили создать новые эффективные технологические процессы изготовления трубчатых деталей, в том числе деталей гидрогазовых систем летательных аппаратов и судовых трубопроводов.

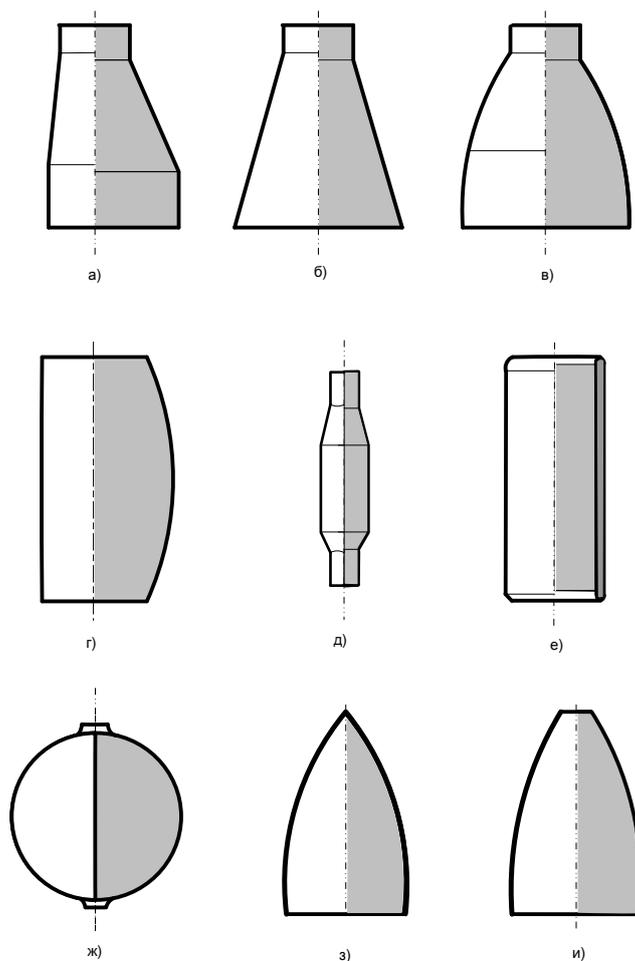


Рисунок 2. Типовые детали, получаемые обжимом и раздачей ТЗ:
а, б, в – переходники; *г* – корпус; *д* – тяга управления;
е – емкость; *ж* – шар-баллон; *з, и* – обтекатели

Во второй главе на основе численного метода решения дифференциальных уравнений упруго-пластических деформаций, предложенного В.И. Одиноким, построена уточненная математическая модель процесса раздачи концов труб.

На рис. 3 представлена схема процесса калибровки раздачей ТЗ. На пуансон *1* с помощью упорного кольца *2* наталкивается цилиндрическая ТЗ *3* со скоростью v^* . Рассматривается осесимметричный процесс деформации.

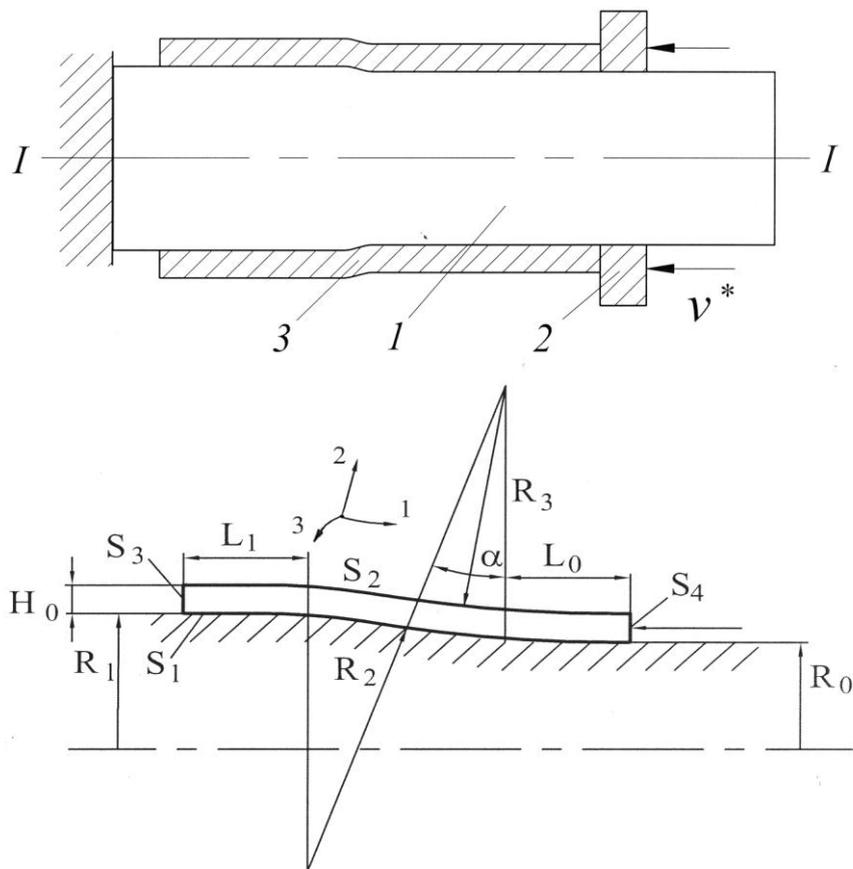


Рисунок 3 – Схема калибровки раздачей трубной заготовки по жесткому пуансону: *1* – пуансон; *2* – упорное кольцо; *3* – трубчатая заготовка

На точность диаметра калиброванного участка будет оказывать влияние форма и размер пуансона, марка материала ТЗ, наличие трения между ТЗ и пуансоном, температура в очаге деформации, толщина стенки и диаметр ТЗ, скорость деформирования. Математическая модель должна ответить на вопрос о возможности получения точных размеров калиброванного участка в процессе калибровки раздачей ТЗ при заданных технологических параметрах процесса с учетом упругой разгрузки.

Примем пуансон абсолютно жестким телом. Рассмотрим деформацию только трубной заготовки.

Будут наблюдаться два процесса. Первый - процесс раздачи, когда под действием упорного кольца происходит наталкивание свободного конца трубной заготовки на жесткий пуансон. Второй – уменьшение диаметра ТЗ после снятия с пуансона за счет упругой разгрузки.

Полагаем, что рассматриваемая область находится в упруго-пластическом состоянии. Деформируемый материал принимается изотропным и несжимаемым. Течение металла считается медленным (пренебрегаем инерционными силами). Массовыми силами также пренебрегаем.

В Эйлеровой системе координат с учетом осесимметричности рассматриваемый процесс опишем следующей системой уравнений:

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

Упругая зона:

$$\sigma_{ij,j} = 0; \quad \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2G \xi_{ij}; \quad \xi_{ij} = 0,5(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (1)$$

Пластическая зона:

$$\sigma_{ij,j} = 0; \quad \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2\lambda \xi_{ij}; \quad \xi_{ij} = 0,5(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (2)$$

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

где σ_{ij} - напряжения; ξ_{ij} - компоненты тензора скоростей деформаций, v_i - компоненты скорости перемещений, δ_{ij} - символ Кронекера, θ - температура, ε - степень деформации, ξ^* - скорость деформации, $\xi^* = H/\sqrt{3}$, $\sigma = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$ - гидростатическое давление, G - модуль сдвига. Функция $T = T(\varepsilon, \xi^*, \theta)$ - определяется из экспериментальных исследований на одноосное растяжение, сжатие.

Определение области расположения упругой и пластической зон производится следующим образом:

если $\varepsilon \geq 0,002$ - пластическая зона;

если $\varepsilon < 0,002$ - упругая зона.

Граничные условия задачи:

$$V_1 \Big|_{S_4} = V^*, \quad V_2 \Big|_{S_1} = 0, \quad \sigma_{22} \Big|_{S_2} = 0, \quad \sigma_{21} \Big|_{S_2} = 0, \quad \sigma_{23} \Big|_{S_2} = 0 \quad (3)$$

$$\sigma_{12} \Big|_{S_i} = 0, \quad i=3,4; \quad \sigma_{11} \Big|_{S_3} = 0, \quad \sigma_{13} \Big|_{S_i} = 0 \quad i=3,4.$$

На контактной поверхности S_1 , примем закон трения в виде:

$$\sigma_{21} \Big|_{S_1} = -\psi \tau_S \frac{v_{ck} \cdot n}{|v^*|} \cos(\alpha, x_2) \quad (4)$$

где $(v_{ck})_i$ - скорость скольжения металла относительно инструмента в направлении оси x_i ; n - нормаль к поверхности контакта S_1 ; ψ - коэффициент трения; v^* - заданная скорость раздачи.

После раздачи, ТЗ снимается с пуансона и под действием внутренних напряжений, полученных в процессе нагружения, упруго деформируется. Для получения уравнений, описывающих процесс разгрузки, разобьем весь процесс разгрузки на малые шаги по времени ($\Delta \tau$). При $\tau=0$ σ_{ij} и σ - значения напряже-

ний внутри деформируемой области в конце процесса нагружения. Число временных интервалов $\Delta\tau_i$ при разгрузке определяется по наличию v_i в детали. Если при $\tau_i = \sum\Delta\tau_i$ получаем, что скорости $v_i=0$ ($i=1,2,3$), то это означает, что внутренние напряжения являются уравновешенными и процесс разгрузки завершен. На каждом временном шаге $\Delta\tau_i$ отыскивается конфигурация разгружаемой детали. При $\tau=\tau_i$ имеем конфигурацию детали после разгрузки. Напряжения σ_{ij} , сохранившиеся внутри детали, будут остаточными.

При решении задачи использовался численный метод, разработанный В.И. Одиноким, в соответствии с которым исследуемая область разбивалась на конечное число ортогональных криволинейных элементов.

Используя приведенную выше методику анализа напряженно-деформированного состояния, были выполнены вычисления, которые позволили сделать следующие выводы.

Как излагалось выше, при калибровке раздачи будут наблюдаться два процесса: раздачи и упругой разгрузки. На рис. 4, а приведены эпюры напряжений σ_{11} и σ_{22} . Эпюры σ_{11} приведены по опорным сечениям, перпендикулярным криволинейной координате x_1 . При этом «косой» штриховкой обозначены сжимающие напряжения σ_{11} ; штриховкой, обозначенной линиями, параллельными криволинейной координате x_1 – растягивающие напряжения σ_{11} . Эпюры напряжений σ_{22} приведены на контактной поверхности и обозначены штриховкой параллельной криволинейной координате x_2 . Как видно из рис. 4, а, наибольшие значения растягивающих напряжений σ_{11} возникают на входе в область раздачи, на наружной поверхности перед сечением перегиба, на внутренней поверхности после завершения формирования радиуса R_1 . Эпюры напряжений σ_{33} приведены на рис. 4, б. Наибольшие значения растягивающие напряжения имеют по σ_{33} .

Интересно, что касание пуансона расширяющейся ТЗ в стационарном режиме имеет место в локальных местах, а не по всей поверхности. Это видно из эпюр σ_{22} , (рис. 4, а).

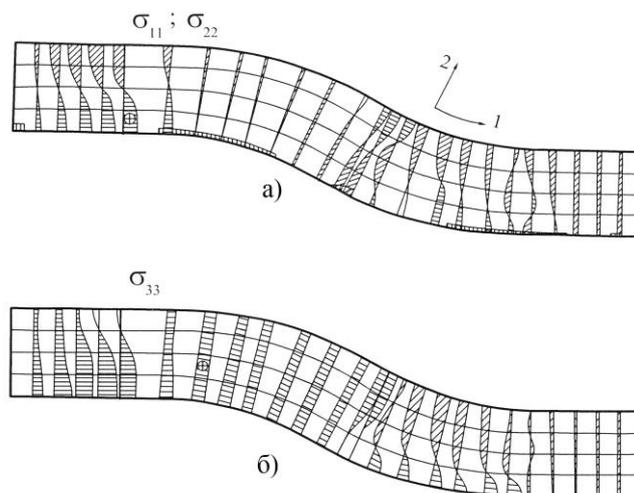


Рисунок 4 — Эпюры распределения напряжений: а- σ_{11} и σ_{22} ; б - σ_{33} ;

В третьей главе показано освоение в производстве процессов деформирования ТЗ и определение качества изготавливаемых деталей.

Исследовались и оптимизировались параметры и методы процессов формообразования деталей из тонкостенных трубчатых заготовок, в т.ч. – конструкции и рабочие тела штамповой оснастки, схемы ЭТО, смазки, влияние формы трубчатых заготовок и т.д. В процессе изготовления опытных образцов проводился анализ конструктивных форм деталей, выбор схем деформирования, определение исходной степени формоизменения, определялись размеры и формы исходных заготовок, производилась оценка технологических возможностей процессов гибки, формовки, раздачи с применением ЭТО и перспектив их применения для изготовления деталей, находящихся в особых условиях эксплуатации.

Предложенные схемы деформирования были реализованы в технологических процессах изготовления деталей элементов трубопроводов из трубчатых заготовок, для осуществления которых разработаны устройства.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПО РАБОТЕ

1. Анализ существующих способов изготовления деталей трубопроводных систем показал, что усложнение форм деталей, повышение требований к точности и качеству их изготовления при сокращении ручных доводочных работ, использование современных высокопрочных материалов требует совершенствования, используемых в настоящее время, оборудования, технологических процессов и методов расчета технологических параметров.

2. На основе численного метода В.И. Одиноква разработана уточненная математическая модель для расчета технологических параметров процесса калибровки раздачей концов труб под пайку, учитывающая упругую составляющую при разгрузке, параметры деформационного и скоростного упрочнения материала, силы трения и температуру деформирования. По результатам теоретических расчетов и экспериментальных исследований установлены зависимости, позволяющие оценить влияние основных технологических параметров процесса на точность получаемых деталей.

3. На базе полученной математической модели разработано программное обеспечение для ЭВМ для обоснования выбора схемы процесса обжима или раздачи, расчета оптимальных технологических параметров и устройств, обеспечивающих получение деталей необходимого качества и требуемых геометрических размеров.

4. В результате проведения экспериментальных исследований были подтверждены принятые в теоретическом анализе допущения и предположения, уточнено влияние механических свойств материала на распределение удлинений. Определены силовые параметры исследуемых процессов. Погрешность в расчете технологических параметров не превышает 15-20%.

5. Предложены эффективные пути оптимизации форм и размеров штамповой оснастки для реализации разработанных процессов в промышленности.

Список публикаций по теме диссертационной работы:

Научные статьи, опубликованные в российских и региональных периодических изданиях и вузовских сборниках:

1. Определение напряженного состояния тонкостенного композиционного стержня замкнутого контура поперечного сечения. /Сокачев А.В., Марьин Б.Н., Сысоев О.Е., Тарасов В.А., Шпорт Р.В., Старцев С.В.// Ученые записки КнАГТУ «Науки о природе и технике». – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2015 №II-1(22) . С. 95-102.

2. Диагностика резервуаров хранения нефтепродуктов / С. В. Старцев, С.Л. Беляев, Ю.Л. Минеев, И.С. Жуков // Надежность машин и промышленная безопасность. – 2015. №2(2) – С. 10-11.

3. Нефтепродуктообеспечение / С. В. Старцев, С.Б. Иванычев, Е.А. Погоришный // Надежность машин и промышленная безопасность. – 2015. №2(2) – С. 46-47.

4. Газификация котельных: преимущества, технологии, стандарты / С. В. Старцев, В.А. Сергеев, Е.А. Погоришный , Н.С. Шамова, Г.Ю. Ильин// Надежность машин и промышленная безопасность. – 2015. №2(2) – С. 56-57.

5. Причины аварий на объектах, использующие сжиженные газородные газы / С. В. Старцев // Надежность машин и промышленная безопасность. – 2015. №2(2) – С. 72-73.

6. Краткий обзор цветной металлургической промышленности в России / С. В. Старцев // Надежность машин и промышленная безопасность. – 2015. №2(2) – С. 80-81.

7. Никелирование цветных металлов / С. В. Старцев, В.И. Литвинский // Надежность машин и промышленная безопасность. – 2015. №2(2) – С. 82-83.

8. Цветная металлургия. Медь. / С. В. Старцев, В.И. Литвинский // Надежность машин и промышленная безопасность. – 2015. №2(2) – С. 84-85.

Тезисы докладов и выступлений:

9. Использование специального программного обеспечения для анализа технологии изготовления деталей летательных аппаратов /Б. Н. Марьин, С.В. Старцев, А.С. Марьин //Фундаментальные исследования в области создания инновационных технологий и новых материалов, направленных на развитие авиационных и космических комплексов. Материалы Междунар.науч.-техн. конф., Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО "КнАГТУ", 2015. - с. 119-122.

Патенты на изобретения и полезные модели:

10. Пат. 156418 Российская Федерация, (51) МПК В 27 G 15/00. Инструмент для обработки отверстия/ Щелкунов Е.Б., Виноградов С.В., Марьин Б.Н., Щелкунова М.Е., Сысоев О.Е., Хейн Вин Зо, Марьин А.С., Старцев С.В.. – № 2015126558; заявл. 02.07.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31.