

На правах рукописи



**Пхьо Вей Аунг**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ПРОЦЕССА РАЗДАЧИ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК  
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.07.02

Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2021

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

Научный руководитель: **Марьин Сергей Борисович**,  
доктор технических наук, доцент, заведующий  
кафедрой «Авиастроение» ФГБОУ ВО  
«Комсомольский-на-Амуре государственный  
университет» (г. Комсомольск-на-Амуре)

Официальные оппоненты: **Моисеев Виктор Кузьмич**,  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры производства летательных аппаратов и  
управления качеством в машиностроении  
ФГАОУ ВО «Самарский национальный  
исследовательский университет имени  
академика С. П. Королева» (г. Самара)

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

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный  
технический университет» (г. Новосибирск)

Защита состоится «17» марта 2021 г. в 15:00 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.092.06 при ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-  
Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-  
Амуре, проспект Ленина, д. 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на сайте  
[www.knastu.ru](http://www.knastu.ru)

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

Автореферат разослан «        » января 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.092.06  
кандидат физико-математических наук



Д.А. Потянихин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Одной из важных проблем в авиастроении является производство надежных гидрогазовых систем самолетов (управления полетом, уборки-выпуска опор шасси и др.), обеспечивающих высокую степень работоспособности, т.к. по причине их отказов на самолетах возникает от 15 до 20% аварий и катастроф.

Важное место в гидрогазовых системах самолетов занимают трубопроводные коммуникации, на которые воздействует комплекс нагрузений: повышенная вибрация, гидравлические удары, температурные перепады, колебания и пульсации высоких давлений.

Значительно снижают функциональность трубопроводных коммуникаций явления, вызванные технологическим процессом их формообразования. Это такие факторы как волнистость и разнотолщинность стенок, чрезмерная эллипсность, отклонения от заданных радиусов перехода от одного диаметра к другому.

К трубопроводным коммуникациям предъявляются высокие требования к точности геометрических параметров, механическим свойствам материалов и качеству поверхностей. Степень отклонения от теоретического профиля сечения (эллипсность) не должна превышать 5 %. Местное утонение  $S_l$  в местах максимальных деформаций должно быть не более 15-20 % от начальной толщины стенки трубы, в зависимости от ее функционирования. Не допускается наличие гофров и вмятин, повышенные требования предъявляются к чистоте поверхности деталей. Для ответственных деталей шероховатость поверхности  $R_z$  составляет 2,5.

Например, для самолетов семейства «Сухой» детали гидрогазовых систем составляют от 15 до 20 % от объема штампованных деталей в конструкции самолета. Трудоемкость каждой преемственно-последующей машины увеличивается на 20-30 % при постоянном уменьшении количества работающих в производственной сфере.

В трубопроводных коммуникациях широко применяются детали, изготавливаемые из трубчатых заготовок: переходники, фитинги, муфты и др. Многие из них изготавливаются раздачей по жесткой матрице с использованием внутреннего давления наполнителя: жидкостного, газообразного и эластичного.

Усовершенствование гидрогазовых систем летательных аппаратов требует непрерывной модернизации технологических процессов, в которых используются универсальные элементы штамповой оснастки. В этом отношении большой интерес представляют процессы раздачи трубчатых заготовок рабочими телами, которые состоят из стержней, гранул и других форм.

В настоящее время существенным образом меняются не только конфигурации гидрогазовых систем, но и наблюдается устойчивая тенденция в применении все 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 (в самолете Су-57 до 32 МПа) различных типов жидкостей или газов, с рабочей температурой от -70 до 300 °С.

В связи с этим представленные в диссертации разработки схем технологического процесса, методики расчета поведения сыпучего материала под нагрузкой и экспериментальные исследования, направленные на повышение эффективности технологии изготовления элементов гидрогазовых систем, являются весьма актуальными.

**Степень разработанности темы исследования.** Теоретические и практические вопросы раздачи тонкостенных трубчатых заготовок рассмотрены в работах отечественных исследователей: Ф.С. Абдулаева, В.А. Барвинка, К.Н. Богоявленского, А.Г. Братухина, В.А. Вагина, Е.В. Генина, В.И. Глазкова, М.Н. Горбунова, О.Ю. Давыдова, А.М. Дмитриева, В.Г. Егорова, В.И. Ершова, Е.И. Исаченкова, А.Н. Кирилина, А.Н. Кобышева, А.Д. Комарова, В.А. Костышева, В.П. Лукьянова, Н.А. Масленникова, В.К. Моисеева, Г.В. Новожилова, А.И. Олейникова, Е.А. Попова, О.В. Попова, Ф.И. Рузанова, О.С. Сироткина, Л.Г. Сухомлинова, С.И. Феокистова, В.А. Ходырева, П.Д. Чудакова, А.С. Чумадина, В.П. Шатеева, А.П. Швецова, В.К. Энгельсберга, О.Б. Яковлевой и др.; а также зарубежных исследователей: T. Altan, B. Carleer, J. Taylor, G.V. Kevie, B.V. Veldhuizen, G.R. Michel, T. Sokolowski, K. Gerke, M. Ahmetoglu, J. Tirosh, A. Neuberger, A. Shirizly, A.S. Selvakumar, B. Surya Rajan, M.A. Sai Balaji and B. Selvaraj, Hein Win Zaw, Hua Zhai, Jiacheng Yao, Jian Zou, Xuepeng Liu, Yushan Wang, Xiao Zhang, Boo Hyun Kanga, Sung Man Shon, L.D Winter, Young Hoon Moon, K. Sutter, Nader Asnafi и др. Большое количество работ посвящено изучению напряженно-

деформированного состояния с целью получения деталей с большими степенями деформирования, минимальной разнотолщинностью и без гофрообразования.

Однако отсутствуют работы, связанные с электротермической интенсификацией процессов раздачи средней части трубчатых заготовок и, как следствие, отсутствуют методики расчета основных технологических параметров указанной обработки. Это ограничивает возможности проектирования новых технологий раздачи, в том числе в области авиационного производства.

**Целью диссертационной работы** является исследование и совершенствование процессов раздачи трубчатых заготовок для деталей летательных аппаратов с применением электротермического воздействия.

**Задачи исследования:**

1. Проанализировать известные процессы раздачи трубчатых заготовок и выявить недостатки традиционных способов их изготовления.
2. Провести анализ напряженно деформированного состояния процессов раздачи трубчатых заготовок сыпучими средами с целью определения предельных технологических возможностей процесса.
3. Провести проектирование и расчет технологических процессов деформирования трубчатых заготовок и разработать устройства и способ по раздаче трубчатых заготовок с использованием электротермического воздействия.

**Область исследования** соответствует п.11. Технологическая подготовка производства объектов авиационной, ракетной и космической техники, включая: - другие методы и средства разработки и осуществления технологических процессов производства и п.12. Технологические процессы, специальное оборудование для изготовления деталей летательных аппаратов, включая технологию: - изготовления деталей обработкой давлением (ковка, штамповка и др.) паспорта специальности 05.07.02 – «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов» (технические науки).

**Объект исследования:** элементы гидрогазовых систем летательных аппаратов (патрубки, муфты, законцовки, переходники и др.).

**Предмет исследования:** механизм реализации процессов деформирования трубчатых заготовок с электротермическим воздействием.

**Научная новизна** диссертации.

1. Предложена комплексная методика процесса раздачи средней части трубчатых заготовок для деталей летательных аппаратов с применением электротермического воздействия, включающая:

- методику расчета распределения напряжений в сыпучем разномодульном упрочняющемся материале, позволяющую управлять нагружением трубчатой заготовки в процессе раздачи средней ее части;

- методику расчета предельных технологических возможностей и прогнозирования дефектов процессов раздачи тонкостенных трубчатых заготовок для летательных аппаратов;

- методику проектирования технологических процессов раздачи элементов гидрогазовых систем летательных аппаратов, позволяющую обеспечить электротермическое воздействие на трубчатую заготовку, что расширяет технологические возможности процесса.

2. Выявлены наиболее благоприятные режимы температуры от 250 до 350 °С при постоянной скорости деформирования в процессе раздачи трубчатой заготовки из титанового сплава ОТ4-1.

**Теоретическая значимость диссертации** заключается в дальнейшем развитии методик определения напряженно-деформированного состояния и основных технологических параметров процессов раздачи, а также в дальнейшем развитии теории предельного деформирования трубчатых заготовок.

**Практическая значимость** работы заключается в том, что совершенствование технологического процесса позволило улучшить качество, снизить затраты и сократить сроки технологической подготовки производства при освоении новых деталей:

1. Предложено новое рабочее тело для раздачи полых и трубчатых заготовок (патент РФ № 2639274), повышающие эффективность устройства.

2. Для деформирования трубчатых заготовок с электротермическим воздействием разработано устройство, позволяющее осуществлять нагрев непосредственно в штампе, позволяющее достигать значительных степеней формообразования.

**Методология и методы исследований**, использовавшиеся в работе. Теоретический анализ процессов раздачи трубчатых заготовок осуществлялся с использованием основных положений теории обработки металлов давлением, теории пластического деформирования трубчатых заготовок, теории упругости.

Экспериментальные исследования и обработки результатов на масштабных образцах и натуральных деталях проводились с использованием поверенного оборудования и измерительного инструмента, стандартных методик определения механических характеристик материалов, металлографических исследований.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Способы и конструкции устройств, реализующие технологический процесс раздачи деталей гидрогазовых систем летательных аппаратов и позволяющие расширить технологические возможности их изготовления.

2. Методика расчета распределения напряжений в сыпучем разномодульном упрочняющемся материале, позволяющая управлять нагружением трубчатой заготовки в процессе раздачи ее средней части.

3. Способ интенсификации технологических процессов раздачи трубчатых заготовок с использованием электротермического воздействия на заготовку.

4. Наиболее благоприятные режимы температуры от 250 до 350 °С при постоянной скорости деформирования в процессе раздачи трубчатой заготовки из титанового сплава ОТ4-1.

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

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: 47-я научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Научно-техническое творчество аспирантов и студентов» (г. Комсомольск-на-Амуре, 10-21 апреля 2017 г.); Всероссийская национальная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (г. Комсомольск-на-Амуре, 09-20 апреля 2018 г.); VII-я научно-практическая конференция с международным участием «Молодежь XXI век» (г. Арсеньев, 13 апреля 2018 г.); Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2018» (г. Владивосток, 2-4 октября 2018 г.); Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (г. Сочи, 25-29 марта 2019 г.);

II Всероссийская национальная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований». (г. Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2019 г.); Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2019». (г. Владивосток, 1-4 октября 2019 г.).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 10 работ, в том числе: две статьи из перечня изданий, определенных ВАК РФ; две статьи, включенные в базу цитирования Scopus; два патента РФ на изобретения.

**Личный вклад соискателя.** Автором проводились теоретические и экспериментальные исследования с последующим анализом и обработкой полученных данных; автор формулировал положения и выводы, выносимые на защиту.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех основных глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 116 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка, 14 таблиц; список литературы включает 95 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** на основе анализа научно-технической литературы, посвященной вопросам изготовления элементов трубопроводных коммуникаций, обоснована актуальность темы диссертации и оценена степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи для ее достижения. Дана краткая характеристика работы, включающая научную новизну, теоретическую и практическую значимость, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен сравнительный анализ современных способов изготовления элементов трубопроводных коммуникаций, исследовано поведение рабочих тел и наполнителей под нагрузкой, рассмотрено состояние вопроса по технологическому использованию электротермического воздействия на трубчатую заготовку.

Показано, что широко распространенная технология изготовления деталей из труб давлением эластичных сред изучена недостаточно для использования ее при изготовлении деталей из авиационных высокопрочных сплавов. Проанализирована номенклатура элементов трубопроводных коммуникаций авиационной техники, определены детали, изготавливаемые раздачей.



В качестве рабочих инструментов для раздачи трубчатых заготовок из-за своей простоты и дешевизны, как правило, выбираются полиуретаны. При пластическом формообразовании эластичными средами поведение материала ограничено температурой нагрева заготовки, а возможность деформирования при комнатной температуре невелика. Существенно повысить степень формоизменения во время формовки-раздачи позволяет введение подпора противодействия. Снижение растягивающих напряжений, происходящее при создании подпора противодействия, позволяет увеличить коэффициент раздачи на 17-24 %.

Применение нагрева является наиболее эффективным направлением интенсификации процессов раздачи, обеспечивающим увеличение пластических свойств деформируемых материалов, но при этом следует отметить, что осуществление процесса при высоких температурах сопровождается разрушением рабочего тела, выполненного из эластомера.

В связи с этим возникает необходимость выбора рабочего тела при нагреве трубчатой заготовки из термостойких материалов, в том числе порошкообразных и гранулированных дисульфида молибдена, оксида алюминия, сернокислого калия и др., либо их комбинации с эластичными материалами.

В результате проведенного анализа была сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

**Во второй** главе исследуется распределение напряжений в сыпучем разномодульном упрочняющемся материале, позволяющие управлять нагружением трубчатой заготовки в процессе раздачи ее средней части.

Закономерности передачи давления пресса рабочей средой на заготовку определяются поведением среды под нагрузкой. Рассмотрены особенности и модели поведения сыпучих материалов, предложенные в работах В.В. Соколовского, А.Ю. Ишлинского, В.В. Новожилова, Г.М. Ломизе, Г.А. Гениева, Д.Д. Ивлева, И.А. Бережного, Б.И. Дидуха, В.Н. Николаевского, С.С. Григоряна, В.А. Иоселевича, Ю.В. Кулинич, А.Л. Крыжановского, Г.П. Черепанова, А.Ф. Ревуженко, А.И. Олейникова, О.А. Coulomb, O. Reynolds, К.Н. Roscoe, I. Vordoulakis, Y.J. Ko, A.W. Bishop, W. Prager, Z. Mroz, J.R. Rice и других авторов.

В основу разработки методики расчета давления сыпучей среды была положена деформационная модель упругопластической сыпучей среды, разработанная А.И. Олейниковым.

Определяющие соотношения этой модели имеют вид:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{\lambda\chi(\chi - \xi)} \left( \frac{\chi\xi}{\chi\xi - 3} \sigma\delta_{ij} + s_{ij} \right) \text{ при } \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \delta \sigma_{ij} > 0, \quad (1)$$

где

$$F \equiv \sqrt{3}\alpha(\xi)\sigma + \tau = 0, \quad \alpha(\xi) = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{0,5(3 - \xi^2)}}{\chi - \frac{1}{3}\xi}, \quad (2)$$

$$\xi = \frac{\varepsilon_{ij}\delta_{ij}}{\sqrt{\varepsilon_{kl}\varepsilon_{kl}}}, \quad \sigma = \frac{1}{3}\sigma_{ij}\delta_{ij}, \quad \tau = \sqrt{\frac{3}{2}} \left( \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma\delta_{ij} \right) \left( \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma\delta_{ij} \right).$$

$S = S_T + S_U + S_{TU}$  – поверхность, ограничивающая рассматриваемое тело объёмом  $V$ ,  $T_i$  – поверхностные нагрузки,  $U_i$  – перемещения,  $U_l$  – проекция перемещения на данное направление единичного вектора  $l$ ,  $T_m$  – компоненты составляющей поверхностного усилия в полости, ортогональной вектору  $l$ ,  $\varepsilon_{mjk}$  – тензор Леви-Чивита.

Соотношение (1) хорошо описывает поведение сухого сыпучего материала на траекториях или вблизи траекторий градиентального нагружения для предельной поверхности Мизеса-Шлейхера (2), для этой траектории квадратичный инвариант тензора напряжений и параметр Лоде не изменяются. Разработаны алгоритмы определения постоянных модели (1)-(2)  $\lambda$  и  $\mu$  ( $\chi = \sqrt{2\mu/\lambda}$ ) на основе стандартных стабилметрических испытаний. При этом, например, для сухого песка получены следующие значения постоянных:  $\lambda = 6,0$  МПа,  $\mu = 4,6$  МПа,  $\chi = 1,23$ .

На основе данных соотношений получена методика расчёта давления сыпучей среды на заготовку в виде краевой задачи для нелинейного дифференциального уравнения относительно окружной деформации. Анализ решения показал, что коэффициент бокового распора, в отличие от гипотезы Янсона, не является константой засыпки. Его изменение хорошо может быть аппроксимировано линейной функцией от давления (среднего нормального напряжения).

Оценка и расчёт основных энергосиловых параметров пластического деформирования могут быть осуществлены на основе метода верхней оценки (МВО), использующего экстремальные свойства действительного поля скоростей идеальной жёстко-пластической среды. Рассмотрены известные реализации этого метода, предложенные в работах Л.М. Качанова, В.Л. Колмогорова, А.Д. Томленова, И.Я. Тарновского, В.М. Сегал, Е.П. Унксова,

Г.В. Иванова, А.Е. Алексеева, R. Hill, H. Kudo, W. Johnson, E.G. Thomsen, S. Kobayashi и других авторов. В основу методики расчёта сил, необходимых для реализации данного пластического течения наполнителя и формуемых участков трубчатой заготовки, был положен функционал верхней оценки в форме, предложенной Г.В. Ивановым и А.Е. Алексеевым. При этом используется конечный элемент, на границе которого допускаются разрывы касательной составляющей скорости. Решение сводится к рассмотрению последовательности вариационных задач о минимуме квадратичного функционала. Разработанная программа тестировалась на решении задачи Прандтля для слоя и была применена для моделирования этапа раздачи трубы.

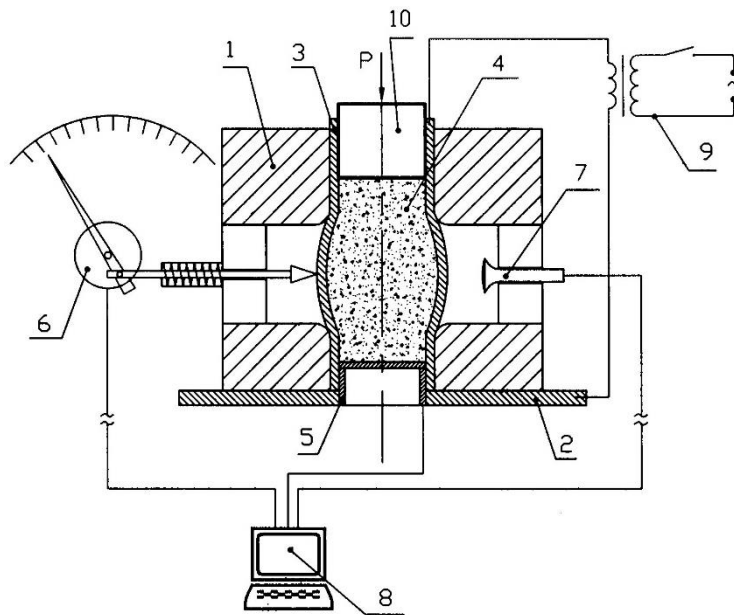
Исследованы предельные возможности при формообразовании титановых сплавов при больших степенях деформации. Анализ влияния температурно-скоростных условий деформации на пластичность титановых сплавов показал, что рост скорости деформации уменьшает деформационное упрочнение и устойчивость деформации, а также снижает эффект нагрева.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что скорость деформации надо поддерживать постоянной в течение штамповочной операции. Для этого необходимо менять скорость деформирования, то есть скорость движения деформирующего инструмента. Для реализации этого необходимо иметь оборудование, которое позволило бы задавать изменение скорости деформирования. Причем такой пресс желательно оснастить встроенной системой нагрева.

Для деформирования трубчатых заготовок с электротермическим воздействием разработано устройство, позволяющее осуществлять нагрев непосредственно в штампе, которое схематично изображено на рисунке 1.

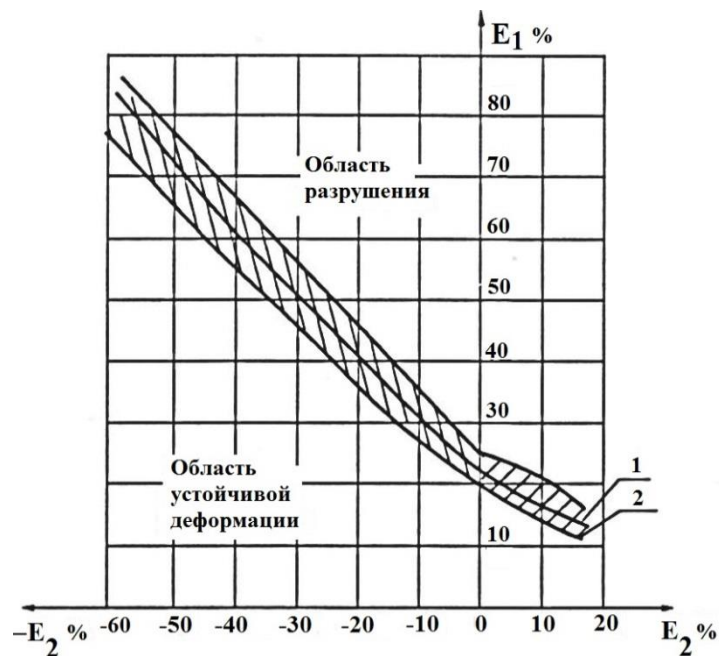
Устройство позволяет испытывать трубчатые заготовки при различных температурах, количественно оценивать величину деформации, отслеживать кинетику процесса пластической деформации по изменению структуры поверхностного слоя и по образованию и поведению внутренних дефектов материала заготовки до ее разрушения.

Итак, оценив влияние скорости деформации и температуры на величину показателя деформационного упрочнения и, тем самым, на величину предельно допустимых деформаций при раздаче по жесткой матрице, можно сделать вывод, что наиболее благоприятная температура деформации титанового сплава ОТ4-1 – от 250 до 350 °С при постоянной скорости деформирования, рисунок 2.



1 – матрица; 2 – основание; 3 – образец трубчатой заготовки; 4 – сыпучая термостойкая неэлектропроводная среда; 5 – тензодатчики для измерения усилия; 6 – датчик для определения величины деформации; 7 – камера тепловизора; 8 – компьютер; 9 – трансформатор; 10 – пуансон

Рисунок 1 – Схема устройства для испытаний трубчатых заготовок при различных температурах



1 - толщина заготовки 1,0 мм; 2 - толщина заготовки 0,8 мм

Рисунок 2 – Диаграмма предельного деформирования для сплава ОТ4-1, температура деформирования 350°C

Изменением коэффициента анизотропии с изменением температуры можно пренебречь, как оказывающего значительно меньшее влияния на протекание исследуемого процесса, чем показатель упрочнения.

На основе представления процесса раздачи как результата приложения к заготовке двух взаимно перпендикулярных главных напряжений и образующихся от их действия двух главных деформаций, исследовано влияние напряженно-деформированного состояния на пределы формоизменения заготовки. Определены предельно допустимые величины деформаций, которые приняты в качестве критерия, определяющего предельные возможности раздачи, рисунок 3.

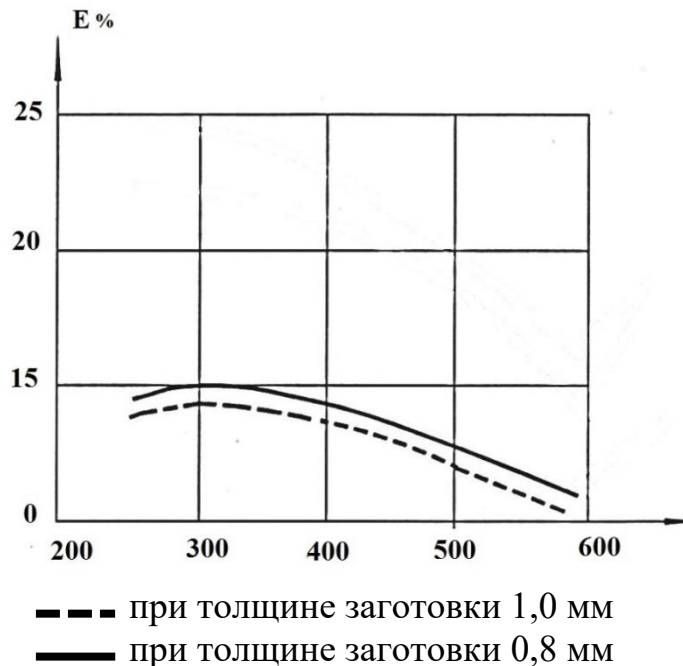


Рисунок 3 – Зависимость величины предельно допустимой деформации для сплава ОТ4-1 от температуры при равномерном двухосном растяжении

**В третьей главе** показано освоение в производстве процессов деформирования трубчатых заготовок и определение качества изготавливаемых деталей, даны рекомендации по выбору перспективных методов электротермического воздействия на заготовку и проектированию технологической оснастки. Исследовались и оптимизировались параметры и методы процессов формообразования деталей из тонкостенных трубчатых заготовок, в т.ч. – конструкции и рабочие тела технологической оснастки, схемы электротермического воздействия, смазки, влияние формы трубчатых заготовок и т.д.

В процессе изготовления опытных образцов проводился анализ конструктивных форм деталей, выбора схем деформирования, определения исходной степени формоизменения; определялись размеры и формы исходных заготовок, производилась оценка технологических возможностей процессов раздачи с применением электротермического воздействия 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 разработано устройство и рабочее тело (патенты РФ №№ 2639274, 2649102).

Формообразование трубчатых заготовок различными рабочими телами проводилось на лабораторной установке ОМД-3, представленной на рисунке 4, с использованием штамповой оснастки, показанной на рисунке 5 для деформирования трубчатых заготовок.



Рисунок 4 – Установка для экспериментального изучения основных видов штамповки



Рисунок 5 – Штамповая оснастка: верхняя (1) и нижняя (2) части матрицы с корпусом (3)

В процессе проведения экспериментов по получению натуральных образцов деталей появлялись характерные дефекты, показанные на рисунках 6 и 7.

Экспериментальные исследования проводились для детали типа переходник из титанового сплава ОТ4-1, который обладает высокой пластичностью и имеет положительный опыт эксплуатации в авиационной промышленности. Длина образца 80 мм, внешний диаметр 32 мм, толщина стенки 1 мм.



Рисунок 6 – Потеря устойчивости трубчатой заготовки



Рисунок 7 – Разрыв материала

В первой серии опытов в качестве наполнителя использовался сыпучий материал и штамп без подпора. После снятия нагрузки и извлечения внутреннего наполнителя проводились замеры образца в двух сечениях (рисунок 8 *а*). Во второй серии экспериментов в качестве наполнителя использовался ледяной стержень в эластичной оболочке и штамп без подпора. Результаты замеров образца в двух сечениях после снятия нагрузки представлены на рисунке 8 *б*. В третьей серии экспериментов в качестве наполнителя использовались эластичные стержни и штамп с подпором. Результаты замеров образца в двух сечениях после снятия нагрузки приведены на рисунке 8 *в*.

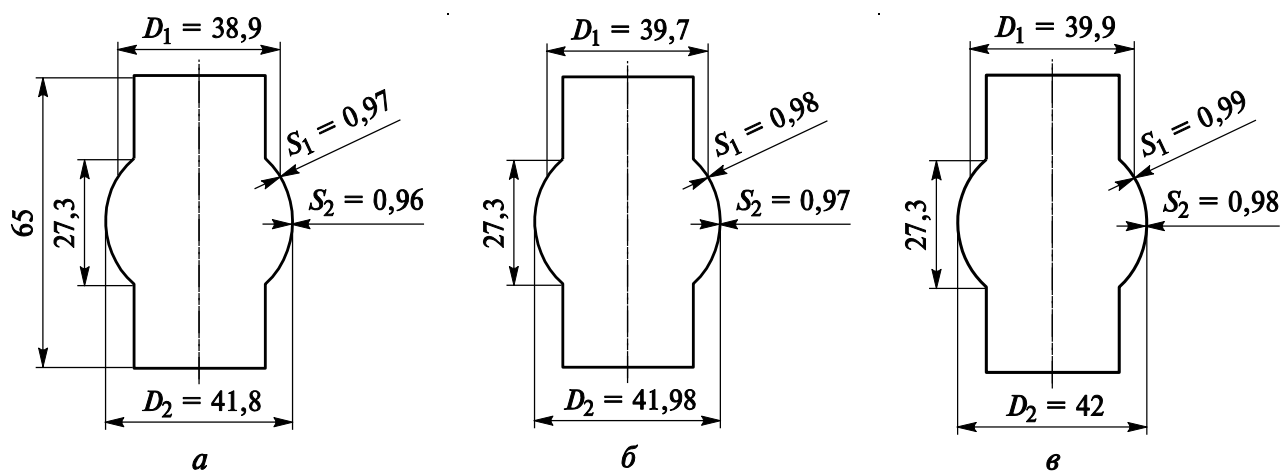
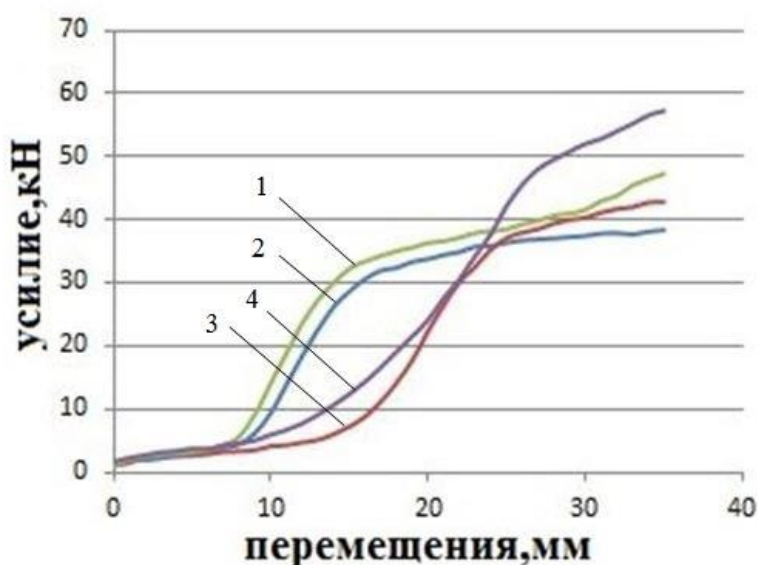


Рисунок 8 – Результаты экспериментальных исследований с применением сыпучего материала без подпора (*а*), ледяного стержня в эластичной оболочке без подпора (*б*), эластичных стержней и штампа с подпором (*в*)

Результаты экспериментов показывают, что точность геометрических параметров и утонение детали зависят от типа используемого рабочего тела и наличия противодействия с внешней стороны трубчатой заготовки.

Применение льда в качестве рабочего тела дает более равномерное распределение усилия внутри трубчатой заготовки. При наличии подпора отмечается снижение образования дефектов в материале трубчатой заготовки и увеличение степени деформирования, что особенно актуально при раздаче трубчатых заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов, например Д16Т, Д19Т и В95. Зависимость усилия прессования от хода поршня представлена на рисунке 9.



1 – резина, штамп с подпором; 2 – резина, штамп без подпора;  
3 – лед, штамп без подпора; 4 – сыпучий материал, штамп без подпора

Рисунок 9 – Зависимость усилия прессования от перемещения пуансона

Технологические возможности деформирования титановых сплавов весьма ограничены, поэтому наиболее часто применяемым способом интенсификации является использование нагрева заготовки в процессе деформирования до температур от 300 до 980 °С, обеспечивающего повышение пластических свойств материала. При этом осуществление процесса деформирования при температурах более 300 °С, как правило, сопровождается разрушением наполнителя, выполненного из резины или полиуретана. Таким образом, необходимо применение в качестве рабочего тела термостойкой резины или сыпучих термостойких материалов, например порошка дисульфида молибдена или окиси алюминия. Целесообразнее и эффективнее с точки зрения производительности исключить стадию снятия заготовки с инструмента и осуществлять непосредственное введение энергии в процессе деформирования.



Для реализации этой технологии предложена конструкция устройства для раздачи трубчатой заготовки из труднодеформируемых сплавов, на рисунке 10 показан общий вид.



Рисунок 10 – Общий вид экспериментальной установки

Установка для проведения исследования была создана на базе традиционно применяемого электротехнического и гидравлического оборудования и включала в себя:

- пресс, предназначенный для фиксации заготовки;
- силовой трансформатор ТОЭСЗ 250/40, обеспечивающий возможность регулирования мощности в широких пределах в зависимости от материала и размерных характеристик заготовки;
- прерыватель РКС-601, обеспечивающий управление параметрами импульса тока – амплитудой и напряжением тока, длительностью импульса, паузой между импульсами;
- токоподводящие кабели первичной и вторичной сети трансформатора;
- электроконтакты, специально спроектированные и изготовленные для обеспечения подвода ИЭТ к трубным заготовкам заданного диаметра;
- регистрирующие приборы: ПК с платой АЦП, предназначенный для определения действительного значения полной электрической энергии в одном периоде сети переменного тока, и трансформатор тока, который подбирался по максимальной величине тока, коммутируемого в первичной цепи.

Использование комбинации сыпучего термостойкого материала и эластичного стержня в рабочем теле ведет к упрощению технологической оснастки, позволяет обеспечить равномерную передачу давления по всем зонам деформирования заготовки при электротермическом воздействии.

В предлагаемом штампе можно осуществлять раздачу деталей из таких материалов, как ПТ7М, ОТ4, ОТ4-1, ВТ20, ВТ23, ВНС-2 и других с

минимальными затратами. Ограниченный объем воздушного пространства вокруг заготовки создает благоприятные условия для исключения газонасыщения поверхностного слоя заготовок, особенно из активных металлов.

Исследования зависимости временного сопротивления на разрыв, удлинения и угла загиба от температуры проводились на универсальной испытательной машине ИР5113-100.

С повышением температуры нагрева при формообразовании, как видно на рисунке 11, существенного изменения предела прочности сплавов ОТ4 и ОТ4-1 в исследуемом интервале температур не наблюдается.

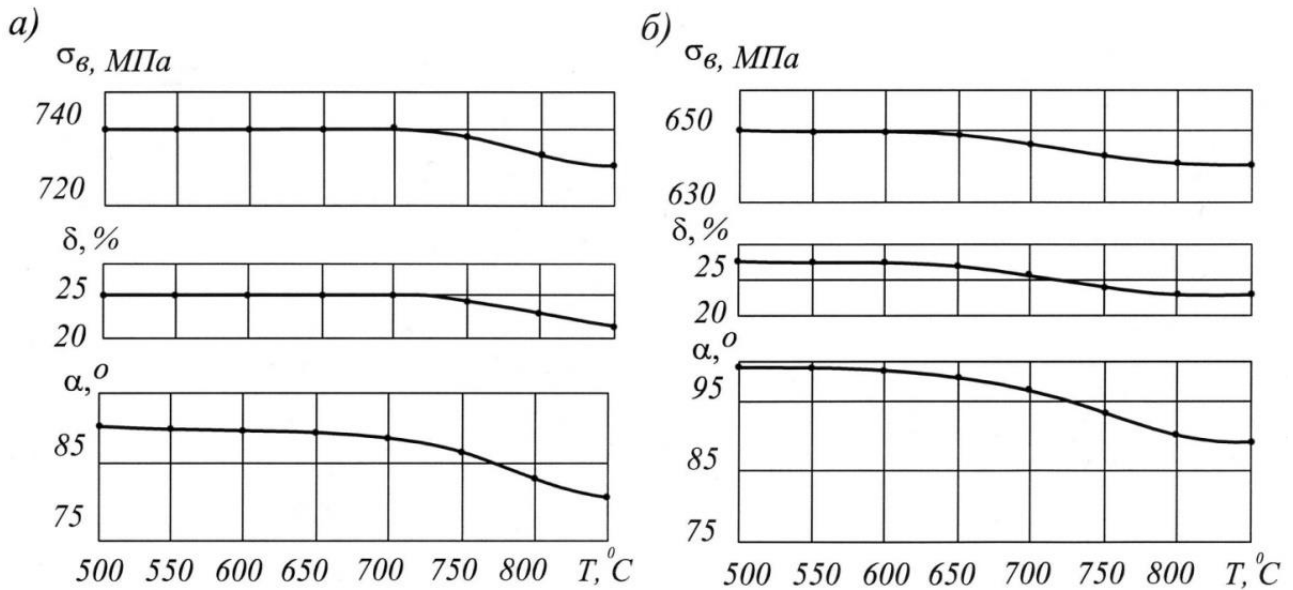


Рисунок 11 – Изменение механических свойств (предела прочности  $\sigma_v$ , удлинения  $\delta$  и угла загиба  $\alpha$ ) получаемых деталей из сплавов ОТ4 (а) и ОТ4-1 (б) после формообразования в зависимости от температуры нагрева

Механические свойства (временное сопротивление на разрыв, удлинение, угол загиба) для образцов из сплавов ОТ4 и ОТ4-1 в исследуемом интервале температур формообразования заготовок находятся в пределах допуска по ТУ.

Исследование микротвердости поверхностного слоя проводилось по известной методике на микротвердомере ПМТ-3. Как видно из графиков (рисунок 12), кратковременный нагрев (10 - 15 с) не приводит к существенному изменению микротвердости поверхностного слоя образцов из сплавов ОТ4 и ОТ4-1 в исследуемом интервале температур.

Исследование хрупкости проводилось деформированием поверхностного слоя образцов твердосплавным наконечником "Роквелл" при нагрузке 1,5 кН. Температура проявления хрупкости на поверхности образцов из сплавов ОТ4 и

ОТ4-1, определяемая по числу микротрещин вокруг отпечатка, составляет при формообразовании с нагревом  $800 \div 850$  °С.

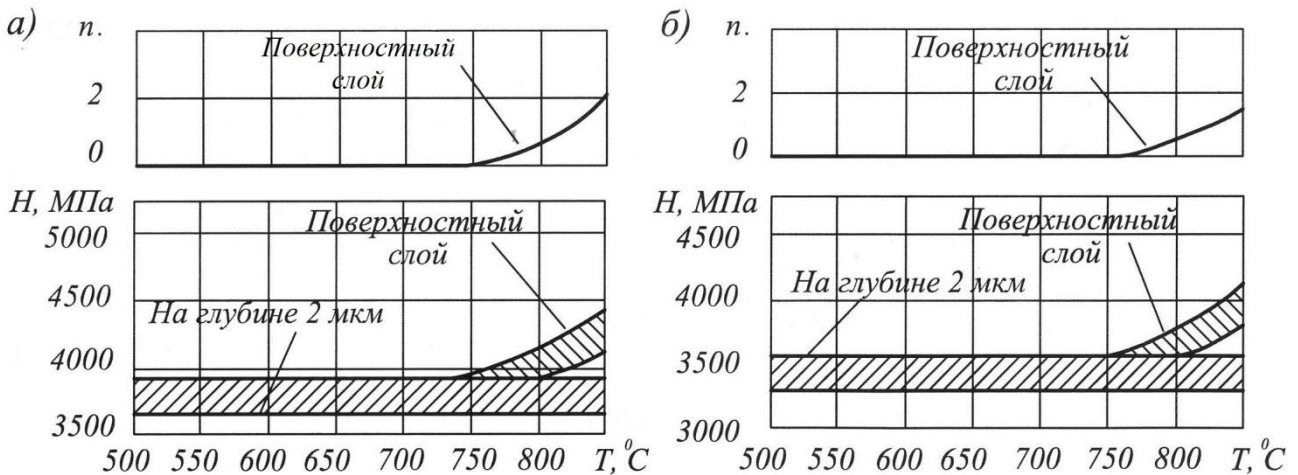


Рисунок 12 – Изменение хрупкости  $n$  - числа микротрещин и микротвердости  $H$  поверхностного слоя и на глубине 2 мкм получаемых деталей из сплавов ОТ4 (а) и ОТ4-1 (б) после формообразования в зависимости от температуры нагрева под формообразование

Исследование газонасыщения поверхностного слоя проводилось после нагрева образцов до температуры  $750 \div 800$  °С.

Содержание кислорода в окисной пленке анализировалось с применением импульсного нагрева испытываемого образца в потоке инертного газа до температуры  $3000$  °С в графитовом тигле и регистрировалось на хроматографе ЛХМ-8МД. Содержание водорода в пленке определялось спектральным методом на трех эталонах с применением низковольтного разряда на спектрографе ИСП-51 в соответствии с ОСТ 90034-81. Метод позволяет достаточно точно определять распределение водорода по глубине газонасыщенного слоя. Содержание азота определялось титрометрическим методом, основанном на растворении пробы в серной кислоте, в соответствии с ГОСТ 9856-1-79. Выявлено несколько повышенное содержание кислорода (но в пределах допуска) в поверхностном слое образцов. Содержание водорода в поверхностном слое не превышает допустимых пределов (для ОТ4 - не более 0,008 %, для ОТ4-1 - 0,004 %). Содержание азота практически неизменно по всему сечению образца.

Проведенными исследованиями установлено, что кратковременный нагрев (10-15 с) до температуры  $750$  °С при калибровке раздачей и формообразовании патрубка из трубчатых заготовок из титановых сплавов ОТ4 и ОТ4-1 не приводит к значительному изменению механических свойств, а также газонасыщению и охрупчиванию поверхностного слоя.



Рисунок 13 – Образцы деталей, полученные в ходе проведения экспериментальных исследований процесса раздачи

В ходе проведения опытных работ по деформированию трубчатых заготовок эластичными и сыпучими средами при электротермическом воздействии были получены образцы деталей, показанные на рисунке 13.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В результате анализа поведения сыпучих материалов при нагружении предложена методика расчёта давления сыпучего наполнителя на трубчатую заготовку с учётом влияния дилатансии, трения, упрочнения и разномодульности, что позволило определить поле распределения давления во внутреннем объёме трубчатой заготовки.

2. В результате выполнения теоретических и экспериментальных исследований разработана методика расчета оптимальных параметров технологических процессов раздачи деталей летательных аппаратов с применением электротермического воздействия на заготовку, которая позволяет уменьшить продолжительность нагрева заготовки и добиться более равномерного распределения температуры заготовки с учетом ее геометрических особенностей.

3. Результаты металлографических исследований не выявили существенных изменений в структуре исследуемых титановых сплавов, подвергшихся электротермическому воздействию, изменение микротвердости и хрупкости поверхностного слоя сплавов не наблюдается, отсутствует газонасыщение, химический состав в поверхностной зоне в пределах нормы.

4. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований процессов деформирования предложены новые способы и конструкции устройств, реализующие технологический процесс раздачи деталей гидрогазовых систем летательных аппаратов, которые позволят повысить производительность труда в 1,2÷1,5 раза и повысить точность на 1-2 качества.

**ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ*****Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ***

1. Марьин, С. Б. Устройство для электротермического воздействия на заготовку / С. Б. Марьин, А. Ю. Гетопанов, **Пхьо Вей Аунг**, В. В. Григорьев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020.- № 7. – С. 69-75.

2. Марьин, С. Б. Сравнительный анализ технологических методов раздачи трубчатой заготовки/ С. Б. Марьин, Д. А. Потянихин, **Пхьо Вей Аунг**, Мин Ко Хлайнг. // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2020. – № 10.

***В изданиях, индексируемых Scopus***

3. Maryin, S. B. Working body for deformation of thin-walled pipe billets / S. B. Maryin, **Phyo Wai Aung** // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 945. – P. 628-633.

4. Maryin, S. B. Device for testing pipe billet / S. B. Maryin, **Phyo Wai Aung** // Solid State Phenomena. – 2020. – Vol. 299. – P. 1166-1171.

***Патенты на изобретения***

5. Пат. 2639274 Российская Федерация, МПК7В 21D41/02. Рабочее тело для раздачи полых и трубчатых заготовок / Б. Н. Марьин, Хейн Вин Зо, **Пхьо Вей Аунг**, С. Б. Марьин. Заявл.13.05.2016; опубл. 20.12.2017, Бюл. № 35.

6. Пат. 2649102 Российская Федерация, МПК7В 21D41/02. Устройство для совмещенной закалки и раздачи нагретой до температуры под закалку трубчатой заготовки из термически упрочняемого алюминиевого сплава / С. Б. Марьин, **Пхьо Вей Аунг**, Мин Ко Хлайнг, М. А. Тимошинин. Заявл.23.03.2017; опубл. 29.03.2018, Бюл. № 10.

***Публикации в других научных изданиях.***

7. **Пхьо, В. А.** Различные типы рабочих тел для передачи давления при раздачи трубных заготовок / Пхьо Вей Аунг, С. Б. Марьин // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 47-й научно-технической конференции студентов и аспирантов. Э. А. Дмитриева (отв. ред.). – 2017. – С. 903-906.

8. **Пхьо, В. А.** Бережливое производство при изготовлении деталей из труб / Пхьо Вей.Аунг, С. Б. Марьин, М. А. Тимошинин // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы Всероссийской научно-

технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 09-20 апреля 2018 г.: в 2 частях / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2018. – Ч. 2 – С. 488-490.

9. **Пхьо, В. А.** Разработка технологии раздачи трубных заготовок / В. А. Пхьо, С. Б. Марьин // Молодежь XXI век: VII-я научно-практич. конф., Арсеньев, 13 апреля 2018 г. / под общ. ред. Ю. П. Денисенко, О. Ш. Бердиева. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2018. – С. 101-103.

10. **Пхьо, В. А.** Устройство для испытаний трубной заготовки при различных температурах / В. А. Пхьо, С. Б. Марьин // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2019 г.: в 3 ч. / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2019. – Ч. 3 – С. 137-139.

**Пхью Вей Аунг**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ПРОЦЕССА РАЗДАЧИ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК  
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 15.01.2021.

Формат 60 × 84 1/16. Бумага 80 г/м<sup>2</sup>. Ризограф EZ570E.

Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ № 30210.

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