На правах рукописи



Мин Ко Хлайнг

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДАЧИ СРЕДНЕЙ ЧАСТИ ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКИ ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ ПО ЖЕСТКОЙ МАТРИЦЕ

Специальность 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2022

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

Научный руководитель:	Потянихин Дмитрий Андреевич,
	кандидат физико-математических наук, доцент кафедры
	«Авиастроение» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
	государственный университет» (г. Комсомольск-на-Амуре)
Научный консультант:	Бормотин Константин Сергеевич,
	доктор физико-математических наук, доцент, профессор
	кафедры «Авиастроение» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-
	Амуре государственный университет» (г. Комсомольск-на-
	Амуре)
Официальные оппоненты:	Карпов Евгений Викторович,
	член-корреспондент РАН, профессор РАН, доктор физико-
	математических наук, ведущий научный сотрудник
	лаборатории механики композитов ФГБУН Института гид-
	родинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения
	Российской академии наук (г. Новосибирск)
	Прокудин Александр Николаевич,
	кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
	лаборатории проблем создания и обработки материалов и
	изделий Института машиноведения и металлургии
	Дальневосточного отделения Российской академии наук
	ФГБУН Хабаровского Федерального исследовательского
	центра Дальневосточного отделения Российской академии
	наук (г. Комсомольск-на-Амуре)
Ведущая организация:	ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный универси-
	тет» (г. Владивосток)

Зашита состоится «28» декабря 2022 В 10:00 часов на заседании г. диссертационного совета 24.2.316.03 при ФГБОУ BO «Комсомольский-на-Амуре государственный 681013, университет» по адресу: г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д. 27.

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

Отзывы автореферат экземплярах (заверенных печатью на В двух учреждения) присылать 681013, Комсомольск-на-Амуре, просим по адресу: г. ФГБОУ проспект Ленина, BO «Комсомольский-на-Амуре д. 27, государственный университет», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.316.03 и по адресу diss@knastu.ru

Автореферат разослан « » ноября 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.316.03 кандидат физико-математических наук, доцент

Григорьева Анна Леонидовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современном машиностроении в целом, и в авиастроении в частности, формообразующие операции листовой штамповки имеют широкое распространение. В самолетах доля тонкостенных деталей, полученных штамповкой, может доходить до 70 процентов. Применяются операции листовой штамповки и в других отраслях машиностроения, таких как автомобилестроение, пищевая и нефтеперерабатывающая промышленность. Поэтому крайне необходимо проводить всестороннее исследование таких процессов с целью совершенствования технологических процессов для сокращения себестоимости и сбережения ресурсов.

Актуальной задачей является разработка и внедрение новых прогрессивных методов заготовительно-штамповочного производства, которые приводят к повышению размерно-геометрической точности изделий. Необходимо внедрять новые теоретические методы исследования процессов штамповки с целью сокращения сроков технологической подготовки производства при внедрении новых деталей на промышленных предприятиях.

Значительное количество деталей, получаемых листовой штамповкой, составляют детали трубопроводных систем. Широко применяются в конструкциях трубопроводов детали с раструбом, фланцем на концах, тороидальной законцовкой, ступенчатые детали, различные переходники и др. Традиционно в качестве рабочего тела, передающего усилие прессования на стенки деформируемой заготовки, в формообразующих операциях, используются эластичные или эластосыпучие материалы.

В настоящей работе на экспериментальном уровне и средствами компьютерного моделирования исследуется технологический процесс раздачи средней части трубчатой заготовки, в качестве материала рабочего тела используется полиуретановый стержень. В зависимости от свойств материала прогнозируется форма оснастки для обеспечения теоретического контура детали, и исследуются технологические возможности на основе использования FLD-диаграмм. Применение таких подходов в промышленных условиях позволит значительно улучшить технологическую подготовку производства новых деталей.

В поиске новых способов интенсификации процессов изготовления деталей, было также исследовано новое рабочее тело в виде льда, помещенного в эластичную оболочку. Такое рабочее тело показало некоторые преимущества по сравнению с упругим.

Степень разработанности темы исследования. Теоретическими и практическими вопросами формообразования деталей из тонкостенных трубчатых заготовок, а также их внедрением в инженерную практику занимались советские и российские ученые Афанасьев А.Е., Бормотин К.С., Веселов А.А., Глазкова В.И., Гречников Ф.В., Дальский А.М., Дель Г.Д., Ершов В.И., Колмогоров В.Л., Кондратенко Л.А., Кузнецов С.В., Легейда В.Ю., Малинин Н.Н., Марьин Б.Н., Марьин С.Б., Непершин Р.И., Орлов Г.А., Павлушин В.О., Полухин П.И., Попова О.В., Сосенушкин Е.Н., Томленов А.Д., Феоктистов С.И., Чумадин А.С. и др. Из зарубежных исследователей можно выделить Ahmad Omar, Almeida B.P.P., Al-Qureshi H.A., Alves L.M., Back C., Faisal Qayyum, Girard A.C., Hidenori Yoshimura, Keeler S.P., Kim S., Loh-Mousavi M., Majid Shahzada, Nader Asnafi, Ramezani M., Rohitha Keerthiwansa, Selvakumar A.S., Thiruvarudchelvan S., Xia Z.C., Yang Lianfa. Yang B., Yeoh O.H., Yeong-Maw Hwang. Zhao Guifeng. Zhubin He и др.

Перечисленными выше авторами опубликовано большое количество работ, охватывающих все аспекты технологии изготовления тонкостенных деталей способами листовой штамповки, экспериментальных и теоретических исследований процессов их изготовления. В последние годы значительное количество исследований проводится с привлечением средств компьютерного моделирования, главным образом методом конечных элементов. Изучаются напряженно-деформированное состояние, влияние дефектов материала на прочность, технологические возможности процессов изготовления.

В работах Бормотина К.С. исследовались вопросы пружинения авиационных материалов в процессах обтяжки панелей самолетов. Описание таких процессов проводилось с помощью постановки и решения обратных задач, в которых определялись силовые и кинематические параметры деформирования по заранее заданной остаточной форме детали после упругой разгрузки. Им был разработан итерационный метод, реализованным в программах инженерного анализа. Также решались задачи оптимального управления параметрами технологического процесса и проводилась разработка методов их решения.

В настоящей работе подходы и методы Бормотина К.С. были обобщены на решение осесимметрических задач формообразования деталей из тонкостенных трубчатых заготовок. Таким образом были произведены постановки и разработаны методы решения обратных задач, прогнозирующие контур оснастки.

Исследованию метода FLD-диаграмм посвящены работы, Sachs G., Keeler S.P., Marciniak Z., Kuczynski K., Lubahn I. D., Swift H.W., Томленова А.Д., Hill R., Головлева В.Д., Деля Г.Д., Матвеева А.Д., Феоктистова С.И., Чумадина А.С.

В настоящем исследовании метод FLD-диаграмм был применен для прогнозирования предельных технологических возможностей процесса раздачи средней части трубы, проведено сравнение с экспериментальными исследованиями.

Целью диссертационной работы является совершенствование методики расчета формы оснастки для обеспечения теоретического контура при изготовлении деталей раздачей средней части трубчатой заготовки с учетом пружинения материала и определение технологических возможностей процесса раздачи.

Задачи исследования:

1. Проанализировать известные процессы создания деталей из тонкостенных трубчатых заготовок способом раздачи, а также современные подходы к моделированию таких процессов.

2. Сформулировать задачи деформирования тонкостенных трубчатых заготовок в виде вариационных формулировок с контактными ограничениями, разработать методику численного решения, позволяющую определять форму матрицы, которая обеспечивают заданную остаточную форму детали после раздачи рабочим телом средней части трубчатой заготовки и разгрузки с учетом пружинения. 3. Выполнить экспериментальные исследования процесса раздачи средней части трубчатой заготовки по жесткой матрице с применением упругого стержня и ледяного стержня в эластичной оболочке в качестве рабочих тел.

4. Выполнить расчеты предельных технологических возможностей процесса раздачи трубчатой заготовки с использованием различных критериев определения предельных деформаций, проверить корректность расчетов сравнением с экспериментальными исследованиями.

Объект исследования: формообразование детали при технологическом процессе раздачи средней части трубчатой заготовки по жесткой матрице внутренним давлением рабочего тела.

Предмет исследования: напряженно-деформированное состояние и прочность материала деформируемой детали, предельные технологические возможности при формообразовании.

Научная новизна работы:

1. Предложена математическая формулировка обратных задач по расчёту формы оснастки, обеспечивающей теоретический контур тонкостенной детали с учетом пружинения материала заготовки в виде вариационных формулировок с контактными ограничениями для численного решения методом конечных элементов.

2. Установлены предельные технологические возможности процесса формообразования при раздаче средней части тонкостенной трубчатой заготовки с целью прогнозирования дефектов изготовления тонкостенных осесимметричных деталей на примере титанового сплава OT4-1.

3. На экспериментальном уровне установлено, что использование ледяного стержня в эластичной оболочке в качестве рабочего тела при раздаче средней части трубчатой заготовки по жесткой матрице приводит к увеличению коэффициента раздачи по сравнению с эластичным стержнем.

Теоретическая значимость диссертации заключается в дальнейшем развитии методов определения напряженно-деформированного состояния и основных технологических параметров процессов листовой штамповки тонкостенных трубчатых заготовок, а также в дальнейшем развитии численных методов решения обратных задач деформирования в упругопластичности.

Практическая значимость заключается в развитии методик расчета предельных технологических возможностей и прогнозирования дефектов процессов изготовления тонкостенных трубчатых деталей, а также в развитии численных методов определения формы оснастки, обеспечивающей теоретический контур детали в зависимости от физико-механических свойств материала, что повышает качество разработки технологического процесса и может сократить сроки технологической подготовки производства при внедрении новых деталей на промышленных предприятиях. Методика решения обратных задач упругопластичности на основе итерационной процедуры адаптирована для решения осесимметрических задач формообразования и реализована в MSC.Patran, MSC.Marc.

Методология и методы исследований, использовавшиеся в работе. Теоретический анализ процессов раздачи трубчатых заготовок осуществлялся с использованием основных положений и широко используемых моделей теории пластичности, теории упругости и теории обработки металлов давлением. Применяемые численные методы определения напряженно-деформированного состояния прошли апробацию. Экспериментальные исследования и обработка результатов на натурных деталях проводились с использованием поверенного оборудования и измерительного инструмента, стандартных методик определения механических характеристик материалов. Решение задач методом конечных элементов проводилось с использованием программных продуктов MSC.Patran, MSC.Marc, ANSYS.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика решения обратных задач упругопластичности по расчёту формы оснастки, обеспечивающей теоретический контур тонкостенной детали с учетом пружинения материала заготовки, на основе итерационной процедуры, реализованная в пакетах МКЭ-анализа MSC.Patran, MSC.Marc.

2. Методика определения параметров модели Муни-Ривлина для упругого материала рабочего тела, основанная на аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов и с помощью модуля оптимизации в пакете инженерного анализа ANSYS.

3. Методика интенсификации технологического процесса раздачи с использованием комбинации упругих и неупругих сред в качестве рабочего тела, передающего усилие от пресса к деформируемой детали.

4. Методика определения предельных технологических возможностей процесса раздачи средней части тонкостенной трубчатой заготовки с помощью компьютерного моделирования с использованием энергетических (Хилла-Свифта) и геометрических (Сторена-Райса) критериев.

Достоверность результатов работы подтверждается использованием фундаментальных принципов механики деформируемого твердого тела (в том числе теории упругости, теории пластического течения), обоснованностью принятых допущений, корректными математическими методами исследования решаемых задач, использованием апробированных численных методов, использованием общеизвестных и хорошо зарекомендовавших себя пакетов инженерного анализа, а также удовлетворительным совпадением теоретических расчетов и результатов вычислений с экспериментальными исследованиями и результатами компьютерного моделирования.

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

• 5th International Conference on Industrial Engineering Международная научнотехническая конференция «ICIE 2019» (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.);

• 14th International Conference On Mechanics, Resource And Diagnostics Of Materials And Structures «MRDMS 2020» (г. Екатеринбург, 09-13 ноября 2020 г.).

• Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению (г. Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля 2022 г.); • VI Дальневосточная конференция с международным участием «Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в металлургии и машиностроении» (г. Комсомольск-на-Амуре, 05–07 октября 2022 г.)

• Механика деформируемого твердого тела в проектировании конструкций (г. Пермь, 10–12 октября 2022 г.)

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 13 работ, в том числе две статьи из перечня изданий, определенных ВАК РФ, две статьи включены в базы цитирования Scopus, три статьи включены в база цитирования Web of Science, а также получен один патент РФ на изобретения.

Личный вклад соискателя. Автор выполнил весь объем экспериментальных исследований и их обработку, построил модели и провел вычислительные эксперименты в пакетах инженерного анализа, участвовал во всех этапах работы, сформулировал выводы и положения, выносимые на защиту, принимал активное участие в написании статей и апробации результатов на научно-технических конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 114 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 194 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, отражена степень разработанности, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Перечислены положения, выносимые на защиту. Отмечена степень достоверности и апробация полученных результатов.

В первой главе проведен анализ современных способов изготовления деталей листовой штамповкой, оговариваются проблемы эффективного использования алюминиевых и титановых сплавов и коррозионностойких сталей. На примере элементов трубопроводов летательных аппаратов приведена классификация деталей, изготавливаемых из трубчатых заготовок давлением наполнителя.

Проведен анализ научной литературы, освещено современное состояние исследований различных аспектов формообразования тонкостенных деталей из трубчатых заготовок. Рассмотрены методики определения напряженно-деформированного состояния деталей при раздаче трубчатых заготовок, применяемые российскими и иностранными исследователями. Выделены аналитические и численно-аналитические методы. Отмечается возросшая популярность метода конечных элементов при моделировании процессов штамповки деталей.

Сделан обзор вариационных методов определения формы оснастки для получения теоретического контура детали с учетом пружинения материала, сформулированы классические вариационные принципы в механике деформируемого твердого тела и основные уравнения модели упругопластического деформирования материалов в рамках теории течения. Рассмотрены методики расчета предельных деформаций с помощью диаграмм предельного формоизменения. Сделан обзор существующих эмпирических и теоретико-эмпирических методов. Приведены принципы построения FLD–диаграмм, связь их характерных областей со схемами нагружения листовых материалов.

Во второй главе приводятся полученные решения обратных задач формообразования деталей из трубчатых заготовок по расчёту формы оснастки, обеспечивающей теоретический контур тонкостенной детали с учетом пружинения материала заготовки.

В проведенном исследовании рассматривается класс обратных задач пластичности, сформулированных в виде вариационных уравнений, с учетом малости деформаций. Для тела объема V, ограниченного поверхностью S, которое при $t \le 0$ (t – параметр нагружения) находилось в естественном недеформированном состоянии, необходимо определить внешние воздействия, приложенные к поверхности S в интервале $[0,t^*]$.

Согласно основным принципам метода конечных элементов, линеаризованное уравнение принципа возможных перемещений, записанное в приращениях, приводится к дискретному аналогу векторных уравнений

$${}^{t}\mathbf{K}\Delta\mathbf{U}={}^{t+\Delta t}\mathbf{R}-{}^{t}\mathbf{F},$$

где ${}^{t}\mathbf{K}$ – матрица жесткости, ${}^{t+\Delta t}\mathbf{R}$ – вектор внешних сил, ${}^{t}\mathbf{F}$ – вектор внутренних сил. После определения вектора приращений узловых перемещений $\Delta \mathbf{U}$ из системы линейных уравнений, решение ${}^{t+\Delta t}\mathbf{U}$ для вектора узловых перемещений в момент времени $t + \Delta t$ определяется по формуле ${}^{t+\Delta t}\mathbf{U} = {}^{t}\mathbf{U} + \Delta \mathbf{U}$. Это решение уточняется методом Ньютона–Рафсона, пока вектор невязки на i-ой итерации ${}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(i)}$ не станет близким к нулевому вектору в пределах заданной относительной погрешности решения.

В случае двумерной постановки задачи, $V \subset R^2$ – ограниченная область трубчатой заготовки с достаточно регулярной границей *S*. Контактная поверхность (контур) жёсткого тела (матрицы) с деформируемым обозначается через S_c ($S_c \subset S$). Обозначим через $u = (u_1, u_2)$, $\tilde{u} = (\tilde{u}_1, \tilde{u}_2)$, $\bar{u} = (\bar{u}_1, \bar{u}_2)$ векторы текущих перемещений, остаточных перемещений деформируемого тела и вектор перемещений контактного тела, соответственно. Точкой над символом обозначаются скорости текущих и остаточных перемещений \dot{u}_i , $\dot{\tilde{u}}_i$.

В случае тонкостенных конструкций задача формообразования рассматривается в условиях пластичности с учётом малых деформаций, но больших перемещений и поворотов (общая Лагранжева формулировка). Для построения метода решения обратной задачи формообразования с контактной жёсткой матрицей рассматривается квазистатический вариационный принцип с функционалом

$$J(\dot{\bar{u}}, \dot{\bar{u}}, \dot{\tilde{u}}) = \frac{1}{2\varepsilon_1} \|\dot{\bar{u}} - \dot{\bar{u}}^*\|_{S_c}^2 + W_c + a(\dot{\bar{u}}, \dot{\bar{u}}) + (\dot{\bar{p}}, \dot{\bar{u}})_{S_p} + a(\dot{\tilde{u}}, \dot{\tilde{u}}) + \frac{1}{2\varepsilon_2} \|\dot{\tilde{u}} - \dot{\tilde{u}}^*\|_{S}^2,$$
(1)
$$\varepsilon_1 > 0, \ \varepsilon_1 \to 0, \ \varepsilon_2 > 0, \ \varepsilon_2 \to 0,$$

где W_c – контактный потенциал, полученный наложением контактных условий на формулировку уравнений движения тел методом множителей Лагранжа или методом штрафных функций и дифференцированием по t; $t \in [0,T]$ – параметр деформирования тела; p – давление с внутренней стороны заготовки S_p ; $\dot{\tilde{u}}^*$, $\dot{\bar{u}}^*$ – заданные остаточные скорости перемещений тела и текущие скорости перемещений контактного тела; потенциальные формы определяются в виде

$$\begin{aligned} a(\dot{u},\dot{v}) &= \int_{V} \left[\partial E(\dot{u}_{i,j}) / \partial \dot{u}_{i,j} \right] \dot{v}_{i,j} dV, \ a(\dot{\tilde{u}},\dot{\tilde{v}}) = \int_{V} \left[\partial \tilde{E}(\dot{\tilde{u}}_{i,j}) / \partial \dot{\tilde{u}}_{i,j} \right] \dot{\tilde{v}}_{i,j} dV \\ E(\dot{u}_{i,j}) &= (1/2) c_{ijpl} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{pl} - c_{ijpl} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{pl}^{p} + (1/2) \sigma_{ij} \dot{u}_{p,i} \dot{u}_{p,j}, \\ \tilde{E}(\dot{\tilde{u}}_{i,j}) &= (1/2) c_{ijpl} \dot{\tilde{\varepsilon}}_{ij} \dot{\tilde{\varepsilon}}_{pl} - c_{ijpl} \dot{\tilde{\varepsilon}}_{ij} \dot{\varepsilon}_{pl}^{p} + (1/2) \rho_{ij} \dot{\tilde{u}}_{p,i} \dot{\tilde{u}}_{p,j}, \end{aligned}$$

где c_{ijkl} – компоненты тензора упругих констант, $\dot{\varepsilon}_{ij}$, $\dot{\tilde{\varepsilon}}_{ij}$ – компоненты скоростей текущих и остаточных деформаций:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = (1/2) \left(\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i} + \dot{u}_{p,i} u_{p,j} + u_{p,i} \dot{u}_{p,j} \right),$$

$$\dot{\tilde{\varepsilon}}_{ij} = (1/2) \left(\dot{\tilde{u}}_{i,j} + \dot{\tilde{u}}_{j,i} + \dot{\tilde{u}}_{p,i} \tilde{u}_{p,j} + \tilde{u}_{p,i} \dot{\tilde{u}}_{p,j} \right),$$

$$u_{i,i} = \partial u_i / \partial x_i, \ i, j, p, l = 1, 2.$$

 $\dot{\varepsilon}_{ij}^{p} = \lambda \cdot \partial f / \partial \sigma_{ij}$ — компоненты скоростей пластических деформаций ($\lambda > 0$); $\partial f / \partial \sigma_{ij} = s_{ij}$ — вектор в пространстве компонент девиатора тензора напряжений, направленный по нормали к поверхности текучести; уравнение f = 0 определяет поверхность в пространстве компонент девиатора тензора напряжений.

Условие стационарности функционала приводит к уравнениям равновесия для скоростей текущих и остаточных напряжений в объеме V и граничным условиям на поверхности S.

На основе вариационного неравенства для функционала (1) находится итерационный метод решения обратных задач формообразования:

$$\overline{u}_i^{k+1} = \overline{u}_i^k + \alpha^k (\widetilde{u}_i^* - \widetilde{u}_i^k), \ 0 < \alpha^k < 2, \ k = 0, \ 1, \ 2, \ \dots$$
(2)

С учётом дискретизации вариационных уравнений механики образуются стандартные конечно-элементные уравнения для решения контактной задачи деформирования и разгрузки:

$$\mathbf{K}\dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{R}}, \ \tilde{\mathbf{K}}\hat{\mathbf{U}} = \hat{\mathbf{R}}(\dot{\mathbf{U}}),$$

где **K**, $\tilde{\mathbf{K}}$ – симметричные матрицы касательной жёсткости, определённые для параметра деформирования *t*; $\dot{\mathbf{R}}$ – вектор скорости внутренних и внешних сил; $\dot{\mathbf{R}}$ – вектор скорости сил, обусловленных начальными деформациями и начальными напряжениями. В результате решения первой задачи находится деформированная модель с распределением напряжений и деформаций. Решение второй задачи на основе данных о начальных напряжениях и деформациях определяет перемещения разгрузки. Остаточные узловые перемещения вычисляются по формуле $\tilde{\mathbf{U}} = \mathbf{U} + \hat{\mathbf{U}}$. Рассматривается моделирование формообразования тонкостенной трубчатой заготовки из титанового сплава ОТ4-1 раздачей в матрице методом конечных элементов с использованием CAE-системы MSC.Marc в осесимметричной постановке.

Размеры заготовки: длина трубы 65,5 мм, толщина 1 мм. Титановая заготовка имеет следующие характеристики материала: модуль Юнга E = 110 ГПа, коэффициент Пуассона v = 0,33, предел текучести $\sigma_T = 585$ МПа, модуль линейного упрочнения $E_T = 1070$ МПа.

Для расчета формы штампа итерационным методом зададим необходимые остаточные перемещения заготовки после раздачи с максимальным значением max $\tilde{u}_1^* = 4.9$ мм. Сходимость итерационного метода оценивается по среднеквадратичной норме

$$e^{k} = \xi^{k} / \xi^{1}, \ \xi^{k} = \left(\sum_{s} \left(\tilde{u}_{1}^{k} - \tilde{u}_{1}^{*}\right)^{2}\right)^{1/2},$$
 (3)

где *S* – перемещаемые узлы заготовки, *k* – номер итерации.

Решаются три обратные задачи формообразования деталей: определяются перемещения поверхности матрицы, которые обеспечивают заданную остаточную форму детали после раздачи рабочим телом средней части трубчатой заготовки и разгрузки (извлечения детали из матрицы):

1. кинематическая задача, где в качестве задаваемых параметров используются перемещения узлов заготовки;

2. задача формообразования, в которой действие рабочего тела заменено однородным внутренним давлением;

3. задача формообразования, в которой воздействие на деформируемую деталь передаётся через рабочее тело посредством давления на него пуансоном.

При кинематической постановке (рисунок 1), задаются перемещения узлов трубчатой заготовки. В данном случае моделирование деформируемой заготовки выполнено одномерными двухузловыми элементами.

В результате расчета итерационным методом (2) найдены перемещения средней части заготовки, максимальные значения которых $\max u_1 = 5,0$ мм. Таким образом, по данным перемещениям определяется форма поверхности штампа при раздаче трубчатой заготовки. При $\alpha^k = 1$ график сходимости (3) представлен на рисунке 2.

При решении второй обратной контактной задачи действие рабочего тела заменено однородным внутренним давлением (рисунок 3). Моделирование деформируемой заготовки выполнено плоскими четырехузловыми элементами для осесимметричных задач. Для расчета необходимой формы оснастки в задаче раздачи трубы рассматривались радиальные перемещения по оси x_2 . Заданные остаточные отклонения задаются перемещениями \tilde{u}_2^* , максимальное значение которых равно 4,9 мм. В исходной модели внутренняя поверхность штампа перемещена на заданные перемещения заготовки, то есть $\bar{u}_2^0 = \tilde{u}_2^*$. Для расчета формы матрицы, обеспечивающей заданные остаточные отклонения трубы после раздачи, были решены следующие задачи: 1. задача деформирования трубы под действием внутреннего давления; в результате заготовка должна быть прижата к элементам матрицы;

2. упругая разгрузка заготовки;

3. в результате полученных остаточных перемещений заготовки итерационным методом (2) определяются перемещения узлов матрицы, по которым изменяется её форма.





1- заготовка, 2 – поверхность штампа Рисунок 1 – Модель заготовки и матрицы при раздаче с заданными перемещениями

Рисунок 2 – График сходимости для кинематической задачи

На каждой итерации сходимость метода оценивается по среднеквадратичной норме (3). При $\alpha^k = 1$ и $\alpha^k = 0.5$ графики сходимости представлены на рисунке 4. В результате расчета итерационным методом найдена форма поверхности штампа для средней части трубчатой заготовки при раздаче. Максимальные отклонения вычисленной поверхности штампа от заготовки будут max $u_2 = 5,0$ мм.

В третьей постановке формулируется и решается обратная задача по определению формы матрицы, когда, согласно технологии раздачи, воздействие на деформируемую деталь передаётся через рабочее тело посредством давления на него пуансоном. Необходимая остаточная форма трубчатой заготовки после освобождения из матрицы и разгрузки задаётся формой жёсткой матрицы. Конечно-элементная модель представлена на рисунке 5.

В качестве рабочего тела рассматривается упругий стержень, механические свойства которого описываются моделью Муни – Ривлина с потенциалом

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3),$$

где константы $C_{10} = 1,7767$ МПа, $C_{01} = -0,85645$ МПа, $C_{11} = 0,2372$ МПа.



 заготовка, 2 – поверхность штампа
 Рисунок 3 – Модель заготовки и матрицы при раздаче однородным давлением



Рисунок 4 – График сходимости при раздаче однородным давлением

Штамп представляет собой жёсткое контактное тело. На поверхностях контакта рабочего тела, заготовки и штампа задано трение с коэффициентом 0,1.

Перемещения определяются на основе решения следующих задач:

1. задача деформирования трубы под действием давления через рабочее тело. В результате заготовка должна быть прижата к элементам штампа (рисунок 6);

2. упругая разгрузка заготовки;

3. в результате полученных остаточных перемещений заготовки определяются перемещения узлов штампа, по которым изменяется его форма.

Данные задачи вычисляются на каждой итерации. В результате решения обратной задачи итерационным методом получены отклонения разгруженной заготовки на каждой итерации (рисунок 7).





 1 – заготовка, 2 – штамп, 3 – рабочее тело Рисунок 5 – Конечно-элементная модель рабочего тела, трубчатой заготовки и штампа

заготовка, 2 – штамп, 3 – рабочее тело
 Рисунок 6 – Конфигурация рабочего тела
 и трубчатой заготовки после деформирования

Таким образом была найдена форма поверхности штампа для средней части трубчатой заготовки при раздаче. Максимальные отклонения вычисленной поверхности штампа от исходного положения заготовки будут max $u_2 = 5$ мм.



Рисунок 7 – Конфигурация заготовки после разгрузки на соответствующей итерации в сравнении с формой штампа на последней итерации и максимальные остаточные перемещения в узле на краю трубчатой заготовки

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований по раздаче средней части тонкостенных трубчатых заготовок из сплавов Д16, 12Х18Н10Т, ОТ4-1 (рисунок 8) с разными рабочими телами (эластичный материал; лёд в эластичной оболочке), в том числе с использованием подпора противодавления холодным пластическим деформированием.



Рисунок 8 – Трубчатые заготовки, используемые в экспериментах: a) – алюминиевый сплав Д16; б) – сталь 12Х18Н10Т; в) – титановый сплав ОТ4-1

В качестве рабочих тел для раздачи трубчатых заготовок, как правило, выбирают полиуретаны из-за простоты изготовления и невысокой стоимости. При пластическом формообразовании эластичными средами поведение материала ограничено температурой нагрева заготовки, а возможность деформирования при комнатной темпера-

туре невелика. Существенно повысить степень формоизменения во время раздачи позволяет нагрев заготовки или введение подпора противодавления.

Раздача средней части трубчатых заготовок различными рабочими телами проводилась на лабораторной установке ОМД-3 (рисунок 9) с использованием жестких матриц 1 и 2, устанавливаемых в корпусе 3 (рисунок 10).



 1 – компьютер; 2– штампы; 3– пресс;
 4– насосная станция
 Рисунок 9 – Установка для экспериментального изучения основных видов штамповки 1– верхняя часть матрицы;
 2 – нижняя часть матрицы;
 3 – корпус
 Рисунок 10 – Штамповая оснастка

В корпусе на основание 2 устанавливают матрицу 1 (верхнюю и нижнюю части), внутри которых размещают трубчатую заготовку 4 и рабочее тело 5 (рисунок 11).





1 – жесткая матрица; 2 – основание; 3 – пуансон;
 4 – трубчатая заготовка; 5 – рабочее тело;
 6 – подпор
 Рисунок 11 – Схема раздачи трубчатой заготовки с использованием внутреннего наполнителя:

а – без подпора; б – с подпором

Рисунок 12 – Схема осесимметричной матрицы для раздачи средней части трубы (половина осевого сечения) Для серии экспериментов с подпором свободное пространство 6 в матрице заполняется водой и замораживается (рисунок 11, б), таким образом, формируется подпор в зоне деформирования средней части заготовки. Далее, посредством перемещения пуансона 3 от ползуна пресса, создается давление во внутренней зоне трубчатой заготовки 4, в результате чего происходит раздача средней ее части. После чего пуансон поднимают вверх, производят разборку матрицы 1 и выемку готовой детали с рабочим телом 5. Чертеж используемой в экспериментах штамповой оснастки приведен на рисунке 12.

Высота матрицы H = 65,5 мм, внутренний диаметр матрицы $R_1 = 32$ мм, радиус криволинейного участка образующей матрицы R = 21 мм, радиусы сопряжения r = 3 мм, толщина матрицы L = 20 мм.

Эксперименты проводились с использованием в качестве рабочего тела эластичного стержня (штамп без подпора и с подпором) и ледяного стержня в эластичной оболочке (штамп без подпора) для сплавов Д16, 12Х18Н10Т, ОТ4-1. Результаты экспериментов показывают, что наличие подпора противодавления позволяет получать больший коэффициент раздачи как минимум на 5%.

Механические свойства материала эластичного рабочего тела определялись в испытаниях на одноосное сжатие на основе стандарта ISO 7743:2011. На рисунке 13 показана деформирования образцов в эксперименте. Начальные размеры $d_0 = 28$ мм, $h_0 = 21,3$ мм. Испытания проводилось на испытательной машине Instron 3382 с применением силиконовой смазки, скорость хода поршня установлена 5 мм/мин, ход поршня – 7 мм. Исследования проводились при комнатной температуре. Находилась зависимость сжимающей силы от перемещения траверсы испытательной машины (рисунок 14).



Рисунок 13 – Схема деформирования эластичного материала



Рисунок 14 – Диаграмма испытания

При одноосном напряженном состоянии напряжения в направлении сжатия могут быть записаны в виде

$$\sigma_{11} = 2 \left(\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \right).$$
(4)

Принимая трехпараметрическую функцию энергии деформации для несжимаемого тела, можно записать потенциал в виде

$$W(I_1, I_2, I_3) = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3).$$
(5)

Константы Муни-Ривлина *C_{ij}* могут быть определялись путем минимизации среднеквадратичного отклонения теоретических напряжений от экспериментальных:

$$E^{2} = \sum_{i=1}^{n} \left(\sigma_{11}(\lambda_{i}) - (\tilde{\sigma}_{11})_{i} \right)^{2} \to \min.$$
(6)

Здесь λ_i обозначает удлинение λ_1 в направлении действия сжимающей силы, соответствующее *i*-му моменту времени; $\sigma_{11}(\lambda_i)$ – теоретическое значение напряжения (4), соответствующее удлинению λ_i ; $(\tilde{\sigma}_{11})_i$ – напряжение в *i*-й момент времени.

Полученные методом наименьших квадратов коэффициенты модели Муни-Ривлина оказались равны $C_{10} = 1,7664$ МПа, $C_{01} = -0,8512$ МПа, $C_{11} = 0,2236$ МПа.

В системе инженерного анализа ANSYS для определения коэффициентов Муни-Ривлина моделировалось одноосное сжатие образца двумя жесткими плитами. В модуле «Direct Optimization» определялся набор таких констант Муни-Ривлина C_{10}, C_{01}, C_{11} и коэффициент трения, при которых значения силы реакции подвижной плиты будут соответствовать экспериментальным значениям силы при одинаковом ее перемещении.

Значения коэффициентов Муни-Ривлина, полученные в системе инженерного анализа ANSYS, равны $C_{10} = 1,7767$ МПа, $C_{01} = -0,85645$ МПа, $C_{11} = 0,2372$ МПа.

На рисунке. 15 представлена геометрическая модель пуансона и трубчатой заготовки в плоской осесимметричной постановке. Пуансон перемещается по вертикали, неподвижное основание имитируется запретом осевых перемещений, матрица зафиксирована.





Рисунок 15 – Геометрическая модель пуансона и трубчатой заготовки

Рисунок 16 – Зависимость усилия гидравлического пресса от хода поршня

После дискретизации геометрической модели и задания граничных условий выполнялся статический расчет напряженно-деформированного состояния. Максимальные напряжения в патрубке не превосходят предел прочности σ_B , что свидетельствует о технологической возможности изготовления детали в режиме холодного деформирования. На рисунке 16 приведено сравнение усилий прессования в зависимости от хода поршня гидравлического пресса в экспериментальных исследованиях и при моделировании.

В четвертой главе проведено исследование технологических возможностей процесса раздачи средней части тонкостенных трубчатых заготовок. При построении FLD-диаграмм для материала использовалась степенная аппроксимация диаграммы деформирования

$$\sigma_i = A e_i^n, \tag{7}$$

которая связывает интенсивность истинных (логарифмических) деформаций

$$e_{i} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\left(e_{1} - e_{2}\right)^{2} + \left(e_{2} - e_{3}\right)^{2} + \left(e_{3} - e_{1}\right)^{2}},$$

и интенсивность напряжений

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

Параметры *n* и *A* выбираются из условий прохождения кривой (7) через точку условного предела текучести с координатами $(e_{0,2},\sigma_{S0,2})$ и точку, соответствующую временному сопротивлению деформирования (e_u,σ_{SB}) для истинных напряжений, и удовлетворения свойствам кривой деформационного упрочнения третьего рода (рисунок 17):



Рисунок 17 – Свойства диаграммы истинных напряжений третьего рода.

Тогда показатель деформационного упрочнения *n* равен деформации шейкообразования и может быть найден численно по формуле

$$n = e_{uu} = \frac{\ln \sigma_{SB} - \ln \sigma_{S0,2}}{\ln e_{uu} - \ln e_{0,2}}.$$
(8)

По критерию положительности добавочных нагрузок деформирование при односном растяжении заготовки устойчиво на возрастающем участке диаграммы и неустойчиво на убывающем участке. При расчете предельной деформации образца при одноосном растяжении в момент наибольшей нагрузки

$$e_{i pac} = n . (9)$$

При равномерном двухосном растяжении

$$e_{i\,pac} = 2n \,. \tag{10}$$

Из сравнения (9) и (10) можно сделать вывод, что при двухосном растяжении в момент образования рассеянной шейки предельные деформации до 2 раз выше, чем при одноосном растяжении, то есть двухосное растяжение плоской заготовки предпочтительнее одноосного растяжения при достаточно больших деформациях листовой заготовки.

Г. Свифт (Swift) получил выражение для предельной деформации:

$$e_{ipac} = 4n \frac{\left(1 - \beta + \beta^2\right)^{3/2}}{4 - 3\beta - 3\beta^2 + 4\beta^3},$$
(11)

где $\beta = \sigma_2 / \sigma_1$, σ_1 и σ_2 – наибольшее и наименьшие главные истинные напряжения в плоскости листа. Используя выражение (11), можно получить уравнение для построения FLD-диаграммы для различных показателей степенного закона упрочнения *n*:

$$4(e_1 - n)(e_2 + 2e_1)^3 - 3(e_1 - 2n)(e_1 + 2e_2)(e_2 + 2e_1)^2 - -3(e_1 + 2n)(e_1 + 2e_2)^2(e_2 + 2e_1) + 2(2e_1 + n)(e_1 + 2e_2)^3 = 0.$$
(12)

Здесь *e*₁ и *e*₂ – наибольшая и наименьшая главные истинные деформации, действующие в плоскости листа.

Хилл (Hill) предложил считать критерием предельного формоизменения момент образования локальной шейки, при котором приращение суммарного усилия равно нулю. Предельная деформация для этого случая определяется как:

$$e_{i\,pac} = 2n \frac{\sqrt{1-\beta+\beta^2}}{\left(1+\beta\right)}.\tag{13}$$

Выражение (13) имеет физический смысл, только если $e_2 < 0$. для построения FLDдиаграммы по критерию Хилла получается уравнение

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

На практике для построения FLD-диаграммы по энергетическим критериям применяют критерий Хилла (14) для $e_2 < 0$ и критерий Свифта (13) для положительно-го значения $e_2 > 0$.

3. Марчиняк (Z. Marciniak) и К. Кужинский (K. Kuczynski) предложили другой способ определения предельных деформаций. С его помощью можно получить уравнение для построения FLD-диаграммы для различных показателей степенного закона упрочнения *n* в виде

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

Диаграмма предельного формоизменения, соответствующая уравнению (15), называется диаграммой Сторена-Райса (Storen – Rice).

Экспериментальные исследования труб из титанового сплава ОТ4-1 по методике ГОСТ 10006-80 «Трубы металлические. Метод испытания на растяжение» позволили определить физико-механические свойства материала: модуль Юнга E = 110 ГПа, предел текучести $\sigma_{0,2} = 570$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 750$ МПа, относительное удлинение после разрыва $\delta = 20\%$.

Переходя к истинным напряжениям и деформациям, были построены кривые предельного деформирования Хилла-Свифта (12), (14) и Сторена-Райса (15).

В ANSYS моделировалось воздействие однородного давления на внутреннюю сторону заготовки из сплава OT4-1. Длина половины заготовки в вычислительных экспериментах выбиралась равной 32,5 мм, радиус полости матрицы варьировался в диапазоне от 19 мм до 23 мм, толщина стенки трубы 1 мм (рисунок 18). В качестве критерия наступления пластического течения выбрано условие текучести Мизеса. Моделирование проводилось с учетом трения (коэффициент сухого трения полагался равным 0,05) и без учета трения. Определялись максимальная e_1 (рисунок 19, а) и минимальная e_2 (рисунок 19, б) главные деформации в плоскости листа.



Рисунок 18 – Геометрическая модель трубчатой заготовки и оснастки



На рисунках 20, 21 представлены результаты определения предельного коэффициента раздачи для материала OT4-1 по FLD диаграммам с использованием результатов моделирования в ANSYS. FLD-диаграммы построены с учетом трения (синяя линия) и без учета трения (красная линия) на поверхности контакта трубы с матрицей. Кривая предельного деформирования Хилла-Свифта (энергетический критерий) обозначена фиолетовым цветом и находится ниже кривой предельного деформирования Сторена-Рейса (геометрический критерий), обозначенной зеленым цветом.

По той же методике исследовались предельные возможности деформирования трубчатой заготовки для алюминиевого сплава Д16. На рисунке 22 представлены результаты определения предельного коэффициента раздачи для трубчатой заготовки при коэффициенте раздачи *K*=1,3125 (*R*=21 мм) по FLD-диаграммам с использованием



0.6

ходит разрушение образца. Этот результат согласуется с экспериментом.

Рисунок 20 – Деформированное состояние заготовки из сплава ОТ4-1 при коэффициенте раздачи *К*=1,3125 (*R*=21мм) – деформирование в зоне безопасного формоизменения



Рисунок 21 – Деформированное состояние заготовки из сплава ОТ4-1 при коэффициенте раздачи K=1,375 (R=22 мм) – опасность возникновения разрывов (без трения), разрушение образца (с учетом тре-

ния)



Рисунок 22 – Деформированное состояние заготовки из сплава Д16 при коэффицинте раздачи K=1,3125 (R=21мм) – разрушение образца

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Моделирование технологического процесса раздачи средней части трубчатой заготовки по жесткой матрице позволило получить следующие результаты.

различных критериев предельного деформирования. Как видно из диаграммы, проис-

1. Сформулирована математическая модель решения обратных задач формообразования осесимметричных деталей с использованием теории малых деформаций, но больших перемещений и поворотов. Задачи деформирования представлены в виде вариационных формулировок с контактными ограничениями для численного решения методом конечных элементов. Разработанная методика решения обратных задач реализована в программном комплексе инженерного анализа MSC.Patran, MSC.Marc.

2. Решены три обратные задачи формообразования деталей из трубчатых заготовок: определяются перемещения поверхности матрицы, которые обеспечивают заданную остаточную форму детали после раздачи рабочим телом средней части трубчатой заготовки и разгрузки (извлечения детали из матрицы): кинематическая задача; задача формообразования, в которой действие рабочего тела заменено однородным внутренним давлением; задача формообразования, в которой воздействие на деформируемую деталь передаётся через рабочее тело посредством давления на него пуансоном. В результате расчёта итерационным методом найдена форма поверхности матрицы для трех перечисленных постановок. Получено удовлетворительное совпадение с экспериментом.

3. Проведены экспериментальные исследования по раздаче средней части тонкостенных трубчатых заготовок из сплавов Д16, 12Х18Н10Т, ОТ4-1 с разными рабочими телами (эластичный материал; лёд в эластичной оболочке), в том числе с использованием подпора противодавления холодным пластическим деформированием. Результаты экспериментов показывают, что наличие подпора противодавления позволяет получать больший коэффициент раздачи как минимум на 5%.

4. Проведено определение механических свойств по трехпараметрической модели Муни-Ривлина для материала эластичного рабочего тела по результатам испытаний на одноосное сжатие, основанное на аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов и с помощью модуля оптимизации в пакете инженерного анализа ANSYS. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования с экспериментом по раздаче трубы эластичным наполнителем, получено удовлетворительное совпадение.

5. Для образцов из титанового сплава ОТ4-1 и алюминиевого сплава Д16 на основе экспериментально определенных физико-механических свойств построены кривые предельного деформирования Хилла–Свифта и Сторена–Райса. В пакете инженерного анализа ANSYS проведены исследования процесса раздачи тонкостенной трубчатой заготовки однородным внутренним давлением с учетом контактного трения и без его учета. Определены технологические возможности процесса раздачи средней части, установлен предельный коэффициент раздачи.

6. Для трубчатого образца из сплава ОТ4-1 с внешним диаметром 32 мм, толщиной стенки 1 мм и коэффициентом контактного трения 0,05, наибольший коэффициент раздачи в безопасной области K=1,3125 (R=21 мм), разрушение гарантированно произойдет при K=1,375 (R=22 мм). Без трения наибольший коэффициент раздачи в безопасной области K=1,34375 (R=21,5 мм), разрушение образца гарантированно произойдет при K=1,4125 (R=22,6 мм). Следовательно, для указанного образца разрушение при наличии контактного трения (коэффициент 0,05) произойдет при коэффициенте раздачи на 2,65% меньшем, чем без трения. 7. Для трубчатого образца из сплава Д16 с внешним диаметром 32 мм, толщиной стенки 1 мм без учета трения с помощью FLD-диаграмм показано, что при коэффициенте раздачи *K*=1,3125 (*R*=21 мм) гарантированно произойдет разрушение, что подтверждается результатами экспериментальных исследований.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. Сравнительный анализ технологических методов раздачи трубчатой заготовки / С. Б. Марьин, Д. А. Потянихин, В. А. Пхьо, Мин Ко Хлайнг // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2020. – № 10(106). – С. 4.

2. Потянихин, Д. А. Моделирование напряженно- деформированного состояния трубчатой заготовки при раздаче средней части по жесткой матрице / Д. А. Потянихин, А. А. Синельщиков, **Мин Ко Хлайнг** // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-2(52). – С. 105-110. (индексируется в Web of Science)

Публикации в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus

3. Hlaing, M. K. Defect analysis of operating hydro-gasified piping system / M. K. Hlaing, P. H. Kyaw, B. N. Maryn // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering – 2019. – Vol. 2. P. 885-894. (Scopus, Web of Science)

4. Bormotin, K. S. Inverse Problem of Calculating the Stamp Shape for Pipe Middle Part Expansion / K. S. Bormotin, D. A. Potianikhin, **M. K. Hlaing** // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – Vol. 272. – P. 401-408. (Scopus)

5. Experimental validation of a mathematical model for forced vibrations of an open thin-walled cylindrical shell / A. Y. Dobryshkin, **M. K. Hlaing**, O. E. Sysoev, E. O. Sysoev // AIP Conference Proceedings. – 2020. – P. 020014. (Web of Science)

Патенты на изобретения

6. Патент № 2649102 С1 Российская Федерация, МПК В21D 41/02. Устройство для совмещенной закалки и раздачи нагретой до температуры под закалку трубчатой заготовки из термически упрочняемого алюминиевого сплава : № 2017109781 : заявл. 23.03.2017 : опубл. 29.03.2018 / С. Б. Марьин, В. А. Пхьо, К. Х. Мин, М. А. Тимошинин ; заявитель ФГБОУ ВО "КнАГТУ".

Публикации в других научных изданиях

7. Мин, К. Х. Моделирование раздачи концов тонкостенных труб по жёсткому пуансону седловидной формы / К. Х. Мин, Х. К. Пхон, Б. Н. Марьин // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и мо-

лодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 08–12 апреля 2019 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2019. – С. 119-122.

8. Анализ дефектов эксплуатируемых гидрогазовых систем трубопроводов / Б. Н. Марьин, В. А. Ким, О. Е. Сысоев, В. В. Куриный, Пхон Хтет Кьяв, Мин Ко Хлайнг // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2017. – Т. 1. – № 1(29). – С. 79-89.

9. Определение групп точности для изготовления монтажных заготовок трубопроводов с разъемными и неразъемными соединениями / Б. Н. Марьин, В. В. Куриный, Х. К. Пхон, К. Х. Мин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2017. – Т. 1. – № 4(32). – С. 88-99.

10. Прогнозирования долговечности работы трубопроводов высокого давления при воздействии малоцикловых нагрузок / Х. К. Пхон, Е. О. Сысоев, Е. А. Кузнецов, **К. Х. Мин** // Труды МАИ. – 2019. – № 108. – С. 2.

11. Мин, К. Х. Экспериментальное и численное исследование процесса формообразования патрубка пневмогидравлической системы самолета раздачей средней части трубы / К. Х. Мин, Д. А. Потянихин, А. А. Синельщиков // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля 2022 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 517-520.

12. Бормотин, К. С. Метод решения обратной задачи раздачи средней части трубы для расчёта формы штампа / К. С. Бормотин, Д. А. Потянихин, А. А. Синельщиков, Мин Ко Хлайнг, И. Н. Журбина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2022. – № 5(61). – С. 40-45.

13. Бормотин, К. С. Расчет формы инструмента при раздаче средней части трубы по жесткой матрице / К. С. Бормотин, Д. А. Потянихин, Мин Ко Хлайнг, А. А. Синельщиков // Механика деформируемого твердого тела в проектировании конструкций. Пермь, 10-12 октября 2022 г. Программа и тезисы докладов. – Пермь: ПФИЦ УРО РАН, 2022. – С. 57.

> Подписано в печать 27.10.2022. Формат 60 × 84 1/16. Бумага 80 г/м². Ризограф ЕZ570Е. Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ

> > Полиграфическая лаборатория

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