

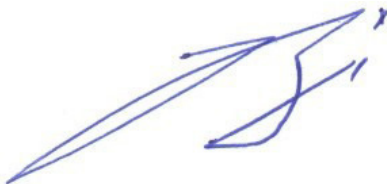
На правах рукописи

Космацкий Ярослав Игоревич

СОЗДАНИЕ ЭНЕРГО- И МЕТАЛЛОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ И
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГЛАДКОСТЕННЫХ И
ПРОФИЛЬНЫХ ГОРЯЧЕПРЕССОВАННЫХ ТРУБ

Специальность 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук



Москва – 2021

Работа выполнена в Акционерном обществе «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»).

Официальные оппоненты:

Каргин Владимир Родионович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» (Самарский университет), профессор кафедры «Обработка металлов давлением» института ракетно-космической техники, г. Самара.

Беляев Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»), заведующий кафедрой «Литейное производство» института цветных металлов и материаловедения, г. Красноярск.

Фастыковский Андрей Ростиславович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» (ФГБОУ ВО «СибГИУ»), заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением и материаловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» института металлургии и материаловедения, г. Новокузнецк.

Ведущая организация федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»), г. Санкт-Петербург.

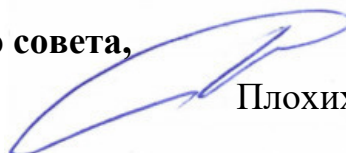
Защита состоится «___» _____ 2021 г., в _____ часов
на заседании диссертационного совета 24.2.331.01, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана (НИУ)», по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана (НИУ)» **и на сайте** <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Плохих Андрей Иванович

Актуальность темы исследования. Трубы из сложнолегированных сталей и сплавов, профильные трубы, изготавливаемые горячим прессованием, имеют высокую стоимость, обусловленную существенной ценой исходной заготовки, значительными технологическими потерями металла, величина которых может достигать 20% от массы заготовки (механические операции при подготовке заготовки, пресс-остаток, утолщенный передний конец трубы), большими затратами, связанными с осуществлением всего комплекса операций технологического цикла прессового цеха. Стоимость горячепрессованных труб может в десятки раз превышать стоимость горячекатаных труб таких же размеров из рядовых сталей. Кроме того, горячепрессованные трубы часто предназначены для дальнейшей переработки в холоднодеформированные трубы. Учитывая малотоннажность партий обрабатываемого металла, широкий диапазон размеров сечения труб и сравнительно невысокую производительность процесса прессования, рентабельность прессового производства может быть достигнута только при максимальной эффективности процесса.

В тех случаях, когда нефтегазовые среды наряду с диоксидом углерода и сероводородом, содержат еще и ионы хлора, для высокопрочных труб хвостовой части скважинной колонны применяют аустенитные коррозионностойкие сплавы, например, SM2535 (Япония). Современная экономическая конъюнктура обуславливает необходимость импортозамещения данной продукции. Необходимым условием для эффективной реализации трудоемкой и ресурсозатраной технологии производства труб из сплава отечественной разработки (110CrNi) являлось проведение глубокого изучения пластических свойств и создание деформационных моделей. Результаты диссертационного исследования послужили основой для создания сквозной высокоэффективной технологии производства насосно-компрессорных труб и муфт к ним, предназначенных для ПАО «Газпром». В настоящее время заявлена необходимость производства обсадных труб из этого же сплава, которая может быть реализована в кратчайшие сроки с использованием научных результатов, полученных автором.

В качестве одного из других примеров следует отметить, что в настоящее время в России горячепрессованные котельные трубы с винтообразным оребрением внутренней поверхности не изготавливаются, а приобретаются за рубежом. Кроме того, отсутствие соответствующей технической документации на трубы сдерживает освоение их производства. Решение перечисленных проблем

потребовало разработки технологии производства и проектирования инструмента для изготовления горячепрессованных труб с винтовым оребрением внутренней поверхности и формирования технических требований на эти трубы.

Поэтому разработка математических моделей процесса прессования труб, их проверка на физических моделях, использование для анализа основных закономерностей и определение режимов процесса прессования, а также разработка новых технологий и технических решений по снижению расхода металла и расширению сортамента изделий являлись актуальными задачами исследования.

Актуальность темы исследования подтверждается планами Министерства промышленности и торговли РФ по импортозамещению в отраслях черной металлургии и гражданского авиастроения (приказы №№ 652, 663 от 31.03.2015 г.), направленными на повышение экономической безопасности страны.

В диссертации использованы результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, полученные автором при выполнении договорной тематики между АО «РусНИТИ» и АО «Волжский трубный завод» (г. Волжский), ООО «ТМК-ИНОКС» (г. Каменск-Уральский) и ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» (г. Верхняя Салда) в период с 2012 по 2019 годы, а также в рамках исполнения Государственного контракта № 18-79-10107 от 08.08.2018 г., заключенного между ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» и Российским научным фондом по теме: «Анализ и моделирование процессов, протекающих при изготовлении бесшовных труб из титановых сплавов различных классов».

Объект исследования. Процесс прессования труб разного назначения из различных сталей и сплавов.

Предмет исследования. Теоретические основы, технологические и проектно-конструкторские решения, обеспечивающие снижение расхода металла и уменьшение нагрузок на деформирующий инструмент при изготовлении гладкостенных и профильных труб с применением процесса прессования.

Степень разработанности темы исследования. В основе широкого промышленного внедрения процесса прессования труб в РФ заложены теоретические, технологические и конструкторские разработки, в выполнение которых значительный вклад внесли С. И. Губкин, И. Л. Перлин, Г. А. Смирнов-Аляев, Л. В. Прозоров, Б. В. Розанов, В. В. Жолобов, Л. В. Степанский, О. М. Шухат, С. И. Борисов, Ю. Ф. Шевакин, С. А. Чукмасов, А. Е. Притоманов, М.И. Медведев, Ю. С. Старостин, А. П. Шляхин, М. З. Ерманок, Ю. В. Манегин и др.

Развитие нефтегазовой, энергетической отраслей промышленности, авиа- и судостроения, атомной энергетики требует значительного числа труб самого разнообразного сортамента. Постоянно возрастающая потребность в бесшовных трубах из специальных высоколегированных сталей и сплавов выдвигает в ряд важнейших задач повышение эффективности трубопрессовых производств за счет создания новых энерго- и металлосберегающих технологий и оборудования.

Цель исследования. Сокращение расхода металла, снижение энергозатрат и расширение сортамента при производстве гладкостенных и профильных горячепрессованных труб.

Задачи исследования:

1. Теоретические исследования особенностей формоизменения металла и энергосиловых параметров процессов прошивки, экспандирования заготовки и прессования гладкостенных и профильных труб.

2. Экспериментальные исследования процессов прошивки, экспандирования заготовки и прессования труб с использованием сконструированных новых экспериментальных установок.

3. Исследование осадки образцов трубных заготовок с построением деформационных кривых и оценкой разогрева металла.

4. Разработка новых способов изготовления и устройств, обеспечивающих повышение эффективности производства горячепрессованных гладкостенных и профильных труб.

5. Разработка и внедрение новых металло- и энергосберегающих технологий и элементов оборудования для производства горячепрессованных труб.

6. Анализ достигнутых показателей качества металлоизделий в разработанных технологических процессах и создание на этой основе новых нормативных документов на трубную продукцию.

Методологическую базу исследования составляют такие методы научного анализа, как системный подход, энергетические принципы теории обработки металлов давлением, математическое моделирование и методы математической статистики.

Обоснование достоверности результатов. Достоверность результатов, полученных при проведении теоретических и экспериментальных исследований, базируется на применении фундаментальных закономерностей механики сплошных сред, теории обработки металлов давлением, методов математической

статистики; учете максимально возможного числа значимых параметров исследуемого процесса; использовании исправного, прошедшего метрологическую поверку испытательного оборудования и измерительного инструмента; положительных результатах промышленного опробования предложенных технологических режимов изготовления труб и конструкций прессового оборудования.

Научная новизна работы:

1. Сформулированы условия осуществления процесса изготовления труб без пресс-остатка с одновременным снижением усилия прессования, достигаемого за счет использования аккумулирующего устройства и рациональной профилировки рабочего инструмента.

2. Выявлена зависимость между коэффициентом трения и динамической вязкостью применяемого смазочного материала.

3. Определены деформационные, кинематические и силовые условия протекания процесса горячего прессования гладкостенных и профильных труб с вращением пресс-иглы.

4. Получены новые эмпирические зависимости, описывающие деформационно-пластические свойства труднодеформируемых сплавов с учетом влияния величины уклона трубной заготовки.

Теоретическая значимость. Получены новые научные знания о величине сопротивления деформации, изменении температуры металла в процессе деформации, влиянии предварительной деформации литой структуры на деформационные свойства сталей и сплавов, подвергаемых прессованию. Создан комплекс математических моделей, позволяющий описать напряженно-деформированное состояние металла в различных способах прессования труб. Использование математических моделей новых ресурсосберегающих способов прессования гладкостенных и профильных труб позволило установить рациональные режимы прессования, обеспечивающие получение качественной продукции при минимальных энергозатратах на производство.

Практическая значимость. В результате решения поставленных задач исследования разработаны новые технологии, оборудование и рекомендации по совершенствованию процесса прессования труб, способствующие сокращению расхода металла при одновременном снижении нагрузок на деформирующий инструмент и изготовлению новых видов трубной продукции:

1. Разработан комплекс новых технических решений (способы и устройства для прессования, конструкции прессового инструмента и стеклосмазочных шайб), обеспечивающих снижение максимального (пикового) усилия при прессовании до 10% и уменьшение расходного коэффициента металла до 7%. Разработанные технические решения внедрены АО «Волжский трубный завод» (АО «ВТЗ») для использования применительно ко всему сортаменту горячепрессованных труб, производимых трубопрессовым цехом № 2 (ТПЦ-2). Экономический эффект обеспечил снижение стоимости труб на 7...13%.

2. Разработаны методика и программный продукт для определения технологических режимов и профилировки инструмента, а также внедрена технология изготовления горячепрессованных труб диаметром от 42 до 89 мм с толщиной стенки от 4,0 до 11,0 мм с четырех-, восьми- и двенадцатиугольным винтовым оребрением внутренней поверхности, являющихся новым видом продукции для отечественной трубной промышленности. Ожидаемый экономический эффект от производства котельных труб по ТУ 14-3Р-157-2018 обеспечит увеличение прибыли ТПЦ-2 АО «ВТЗ» до 30%.

3. Разработан новый способ упрочняющей обработки и внедрены сквозные технологии производства бесшовных труб из высоколегированного коррозионно-стойкого сплава 110CrNi (аналоги: SM2535, ХН30МДБ) по ТУ 14-3Р-139-2014 по схеме: «горячее прессование – холодная прокатка», реализация которых в рамках межзаводской кооперации ПАО «Трубная металлургическая компания» (ПАО «ТМК») обеспечивает производство импортозамещающей трубной продукции для ПАО «Газпром» в объеме 200 т/год с соответствующим экономическим эффектом.

4. Разработан и реализован в кооперации ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» – АО «ВТЗ» – ООО «ТМК-ИНОКС» новый способ изготовления труб размерами 38,1×5,36 мм из титанового сплава Ti-3Al-2,5V по схеме: «горячее прессование – холодная прокатка», экономический эффект применения которого обеспечил снижение себестоимости труб авиационного назначения до 10%.

Положения диссертационного исследования, выносимые на защиту:

1. Математические модели, описывающие напряженно-деформированное состояние металла в исследуемых разновидностях процесса прессования гладкостенных и профильных труб.

2. Закономерности формоизменения торцевой поверхности гильзы в процессах прошивки и экспандирования на прессах вертикальной конструкции.

3. Зависимость величины коэффициента трения от динамической вязкости смазочного материала.

4. Закономерности изменения пластических свойств новых материалов при различных температурно-скоростных и деформационных режимах.

5. Новый метод прессования с использованием устройств, аккумулирующих энергию, а также теоретические и эмпирические закономерности процесса инерционного прессования труб.

6. Новые энерго- и металлосберегающие технологии и конструкции для производства горячепрессованных труб, в том числе труб с винтовым оребрением внутренней поверхности, используемых в энергетическом машиностроении.

Апробация результатов. В полном объёме работа докладывалась в 2021 году на объединенном заседании кафедр «Оборудование и технологии прокатки» и «Технологии обработки материалов» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана (НИУ)». Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: ежегодных заседаниях научно-технического совета АО «РусНИТИ» (Челябинск, 2013 – 2018); XX – XXIII Международных научно-технических конференциях «Трубы» (Челябинск, 2012, 2014, 2016, 2018); VII – IX научных конференциях аспирантов и докторантов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (Челябинск, 2014 – 2016); 65–68-й научных конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (Челябинск, 2013 – 2016); X Международной научно-практической конференции «Теория и практика современной науки» (Москва, 2013); III, IV Международной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований: от теории к практике» (Чебоксары, 2013, 2015); 4th International academic conference «Applied and fundamental studies» (Сент-Луис, США, 2013); 10-й Международной научно-практической конференции «Пластическая деформация металлов» (Днепропетровск, Украина, 2014); 6, 7-ом Международном промышленном форуме «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении» (Челябинск, 2014, 2015); XV Международной научно-технической конференции «Ti – 2017 в СНГ» (Екатеринбург, 2017); Международной конференции «Материалы и технологии для Арктики» (Санкт-Петербург, 2017); XI Международном конгрессе прокатчиков (Магнитогорск, 2017); International conference on materials engineering and science (Стамбул, Турция, 2018); XIX Международной научно-технической Уральской школе-семинаре металловедов

– молодых ученых (Екатеринбург, 2018); научно-технических конференциях молодых специалистов ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» (Верхняя Салда, 2017 – 2019); XI Всероссийской конференции «Реконструкция энергетики» (Москва, 2019); Международной научной конференции «Современные материалы и передовые производственные технологии» (Санкт-Петербург, 2019); XXV Международной промышленной выставке «Металл-Экспо» (Москва, 2019), 5th AIGE/IIETA International Conference and 14th AIGE Conference on «Energy conversion, management, recovery, saving, storage and renewable systems» (Анкона, Италия, 2020).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 84 научных работы, из них 32 статьи в изданиях, рекомендованные ВАК РФ, 1 монография, 11 патентов РФ на изобретения и 6 патентов на полезные модели, 5 свидетельств государственной регистрации программ для ЭВМ, 28 статей в материалах международных и российских научно-технических конференций, 1 свидетельство регистрации базы данных. Общий объем – 41,3 п.л., авторский вклад – 25,2 п.л.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, изложенных на 377 страницах машинописного текста, содержит 129 рисунков, 48 таблиц, список литературы из 363 наименований.

Основное содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, показана теоретическая и практическая значимость работы, определена научная новизна, приведены методы и методология исследования, представлены положения, выносимые на защиту, отмечена степень достоверности и апробация результатов, приведена общая характеристика диссертации.

В **Главе 1** проведен анализ перспективных направлений исследований в области совершенствования процесса прессования труб и расширения сортамента трубной продукции. Рассмотрены технические решения по снижению расхода металла и энергетических затрат при изготовлении труб методом прессования, а также особенности процесса прессования труб с винтовым оребрением внутренней поверхности. Проведен анализ теоретических основ деформации и течения металла в процессе прессования труб круглого сечения и теоретических разработок устойчивого винтового течения металла и выполнения профиля оребрения. Сделаны выводы о современном состоянии уровня науки и техники в области производства труб методом прессования, уточнены задачи исследования и показаны пути их решения.

Глава 2 посвящена разработке комплекса математических моделей, применение которых для теоретического исследования процессов прошивки и экспандирования заготовки, прессования гладкостенных и профильных труб с винтовым оребрением внутренней поверхности позволило установить, соответственно, новые многофункциональные зависимости.

Снижение усилия прессования возможно при использовании матричного узла, отличающегося конической профилировкой заходного отверстия матрицы при его сопряжении с матрицедержателем. Для этого необходима подготовка торцевой поверхности гильзы, что связано с дополнительным расходом металла (до 5% от массы заготовки).

Определение формоизменения профиля торцевой поверхности гильзы, соответствующего конической профилировке заходного отверстия матрицы при его сопряжении с матрицедержателем, проводилось компьютерным моделированием в Deform-3D процессов прошивки и экспандирования заготовки диаметром 145,0 мм из стали марки 08X18H10T по схемам, представленным на Рис. 1.

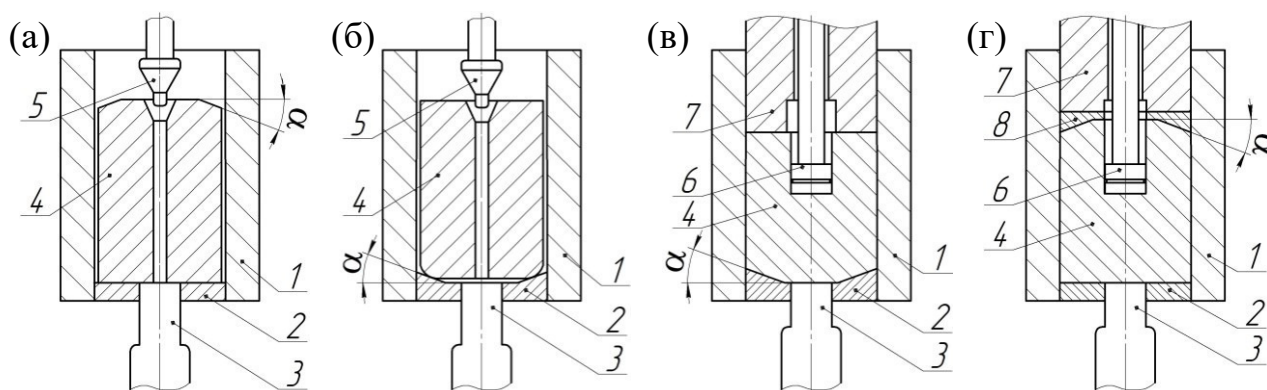


Рис. 1. Схемы формирования конической поверхности гильзы в процессе экспандирования (а, б) и прошивки (в, г): 1 – контейнер; 2 – матрица; 3 – подпорная игла; 4 – заготовка; 5, 6 – экспандирующий и прошивной наконечник; 7 – пресс-штемпель; 8 – шайба

Основываясь на количественной оценке параметра отклика, угла конусности α , теоретически описан процесс формоизменения торцевой поверхности гильзы с получением ее рациональной профилировки. Установлена эффективность реализации конечно-элементных моделей процессов экспандирования (Рис. 1, а) и прошивки (Рис. 1, г).

Полученные конечно-элементные модели гильз подвергались обработке в САПР «КОМПАС-3D V10» и транспонировались в QForm 2D/3D для сравнительного моделирования процесса прессования труб размерами 45,0×4,0 мм с применением прессового инструмента известных конструкций и матричного узла с пресс-шайбой, предложенной профилировки: угол конусности $\alpha = 21^\circ$, радиус скругления $R = 70,45$ мм, соответственно.

Параметры моделирования процесса принимались с учетом фактических технологических значений при прессовании труб в АО «ВТЗ»: диаметр матрицы 46,1 мм; диаметр пресс-иглы 37,6 мм; диаметр контейнера 156,0 мм; длина гильзы 400,0 мм; сопротивление деформации материала 178,4 МПа; температура нагрева гильзы и разогрева инструмента 1150 и 500 °С, соответственно; скорость движения пресс-штемпеля 200 мм/с; коэффициент трения на контактных поверхностях 0,02.

Конечно-элементные модели процесса прессования труб, соответствующие моменту прохождения металла распрессованной гильзы через канал матрицы и выход процесса на установившуюся стадию, изображены на Рис. 2.

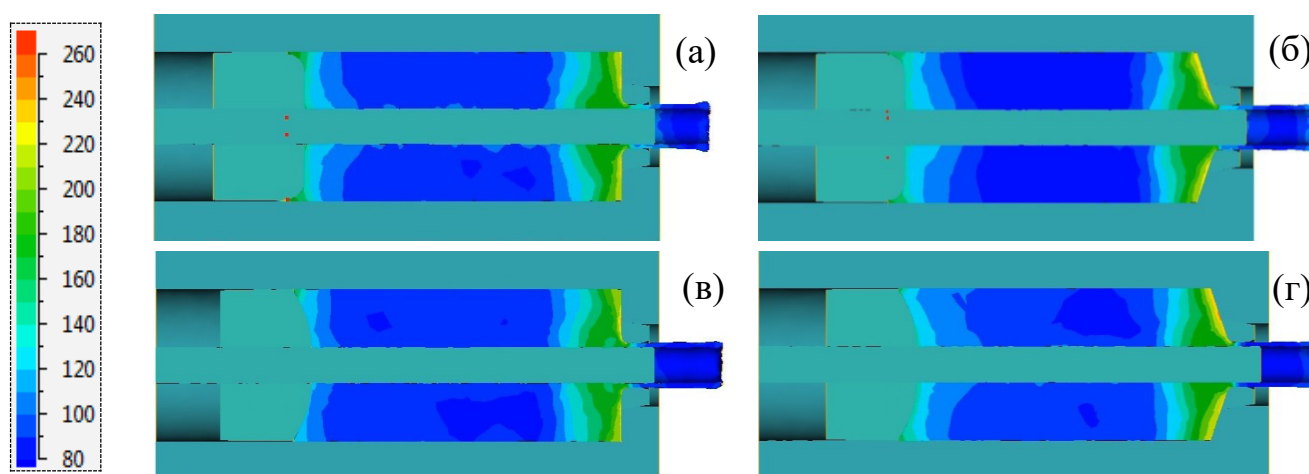


Рис. 2. Распределение напряжений в моделях процесса прессования труб:
 (а) – $\alpha = 0^\circ$, $R = 20,0$ мм; (б) – $\alpha = 21^\circ$, $R = 20,0$ мм; (в) – $\alpha = 0^\circ$, $R = 70,45$ мм,
 (г) – $\alpha = 21^\circ$, $R = 70,45$ мм

На Рис. 3 представлены диаграммы, соответствующие периоду времени, при котором наблюдается максимальное (пиковое) усилие прессования труб. Таким образом, теоретически обоснован принцип формоизменения торца гильзы и последующего прессования труб с применением предложенных профилировок прессового инструмента, и показано снижение усилия прессования до 15,8%.

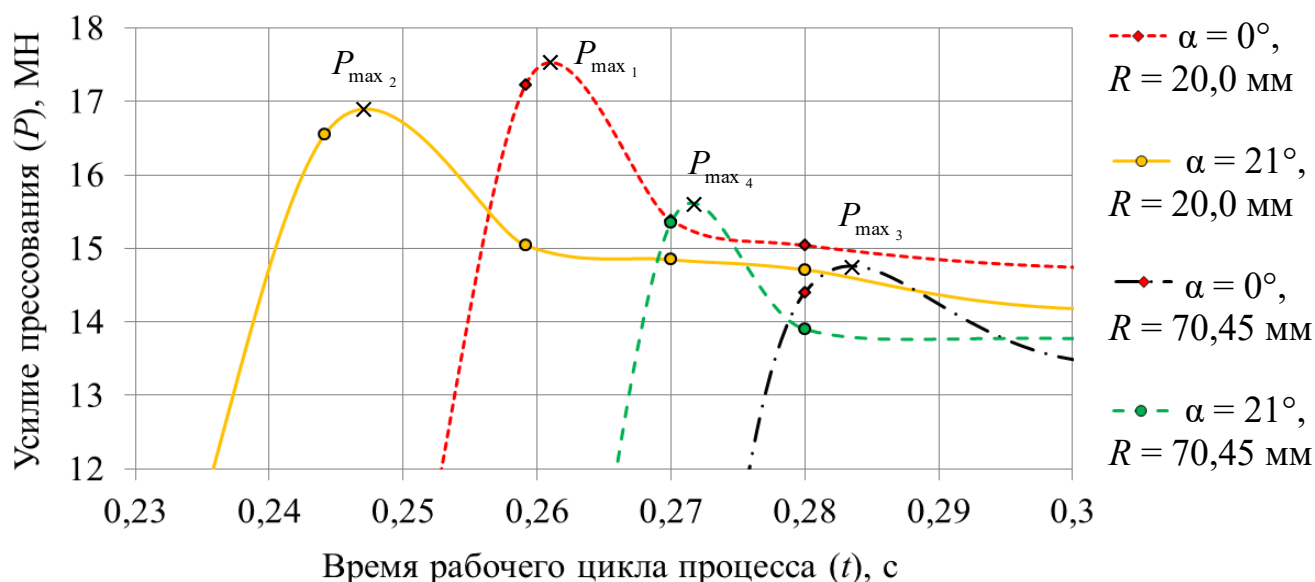


Рис. 3. Сравнительная диаграмма изменения усилия прессования:

$$P_{\max 1} = 17,5 \text{ МН}, P_{\max 2} = 16,8 \text{ МН}, P_{\max 3} = 14,7 \text{ МН}, P_{\max 4} = 15,6 \text{ МН}$$

Полученные результаты использованы для исследования компенсации пиковых нагрузок при учете действия инерционных сил за счет применения аккумулирующего устройства (далее – АУ), силовые параметры которого задавались в Deform-3D известными линейными зависимостями пружин сжатия в диапазоне значений P_{AU} от 40,0 до 50,0 кН и пресс-шайб с углом конусности φ от 0 до 45°.

Результаты моделирования процесса прессования труб размерами 10,0×2,5 мм из свинцовой заготовки размерами 19,0×6,25×20,0 мм со скоростью движения пресс-шайбы 0,25 мм/с представлены на Рис. 4 и 5.

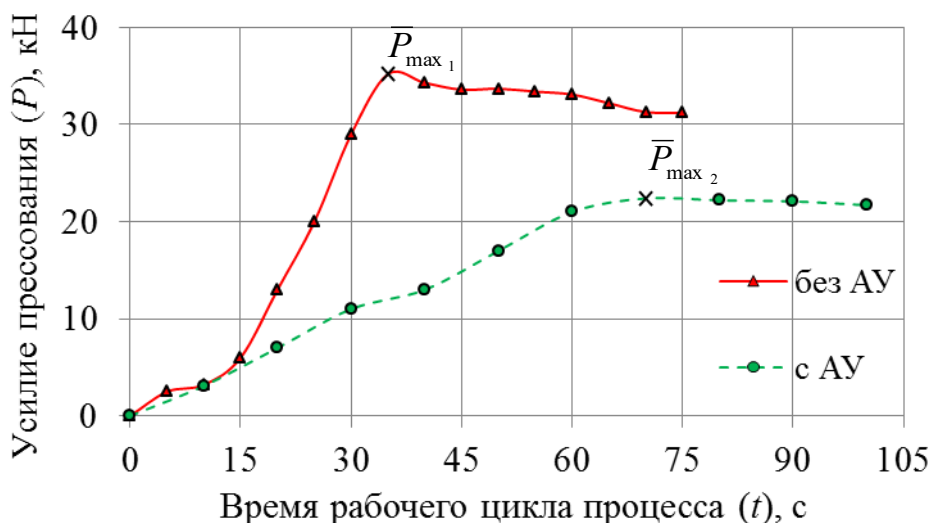


Рис. 4. Зависимость среднего значения усилия прессования от времени рабочего цикла процесса: $\bar{P}_{\max 1} = 35,2 \text{ кН}$, $\bar{P}_{\max 2} = 22,3 \text{ кН}$

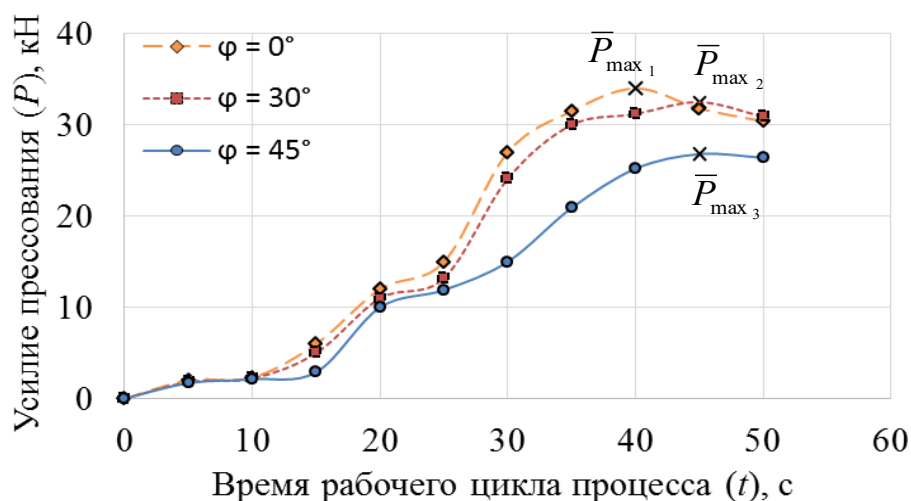


Рис. 5. Зависимости средних значений усилия прессования от времени рабочего цикла процесса при использовании пресс-шайб различных профилировок (без АУ): $\bar{P}_{\max_1} = 34,0$ кН, $\bar{P}_{\max_2} = 32,5$ кН, $\bar{P}_{\max_3} = 26,8$ кН

Снижение усилия прессования с применением АУ (Рис. 4) объясняется затратами работы на деформацию пружины сжатия. Таким образом, используя Deform-3D, показана эффективность нового метода инерционного прессования с АУ, компенсирующего пиковые нагрузки и снижающего усилие прессования на 37%, и при использовании пресс-шайбы конусной профилировки – на 21%.

Для исследуемого процесса учитывалось влияние не только инерционных, но и действие активных сил трения, возникающих в случае принудительного и свободного вращательного движения пресс-иглы. С применением метода баланса мощностей разработан комплекс математических моделей, описывающих действие активных сил трения в процессе прессования труб с вращением пресс-иглы. Взаимосвязь факторов предметной области одного из исследуемых объектов представлена на Рис. 6.

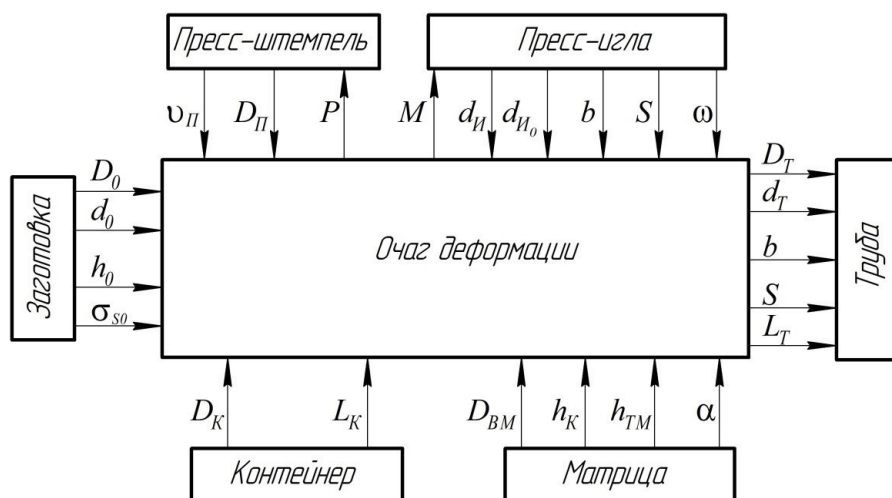


Рис. 6. Концептуальная модель процесса прессования профильных труб

Определяющие параметры (Рис. 6): скорость прессования (v_{II}); диаметр пресс-шайбы, контейнера и гильзы ($D_{II} = D_K = D_0$); внутренний диаметр гильзы равен диаметру пресс-иглы ($d_0 = d_{II}$); высота гильзы (h_0); сопротивление металла пластической деформации (σ_s); диаметр воронки матрицы (D_{BM}); толщина конического и калибрующего участков матрицы (h_K), (h_{TM}); угол конусности матрицы (α); угловая скорость вращения пресс-иглы (ω); диаметр пресс-иглы в зоне накопителя (d_{II0}); шаг винтового нарезка на пресс-игле равен шагу винтового оребрения внутренней поверхности трубы (S); ширина и высота нарезка на пресс-игле равны ширине и высоте оребрения трубы (b). Параметры оклика (Рис. 6): усилие прессования (P); момент сил трения, препятствующий вращению пресс-иглы (M); наружный и внутренний диаметры трубы (D_T), (d_T); длина трубы (L_T).

Расчётные схемы процесса прессования гладкостенных и профильных труб представлены на Рис. 7. Разработанный комплекс математических моделей процесса прессования гладкостенных (1) и профильных (2) труб с винтовым оребрением позволяет определять максимальное значение усилия прессования с вращением пресс-иглы:

$$P = \sigma_s \left[\Phi + \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{\Lambda}{v_{II}} + \mu \Omega \right) \right] + \Psi; \quad (1) \quad P_{IRS} = \sigma_s \left[\Phi + \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{\Lambda_{IRS}}{v_{II}} + \mu \Omega_{IRS} \right) \right] + \Psi_{IRS}, \quad (2)$$

где Φ – функция, определяющая составляющую мощности, развиваемой максимальными касательными напряжениями на поверхностях разрывов скоростей в заготовке; Λ , Λ_{IRS} – переменные параметры зависимостей для определения мощности формоизменения; Ω , Ω_{IRS} и Ψ , Ψ_{IRS} – переменные параметры для определения мощности сил контактного трения на вращающемся и не вращающемся инструменте; μ – коэффициент общей вытяжки металла.

Максимальное значение момента вращения пресс-иглы при прессовании гладкостенных (3) и профильных (4) труб с винтовым оребрением определяется:

$$M = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \mu \sigma_s \omega d_{II}^3 \left(Q + \frac{J}{2v_{II}} \right); \quad (3) \quad M_{IRS} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \mu \sigma_s \omega d_{II}^3 \left(Q_{IRS} + \frac{J_{IRS} d_{II0}^3}{2v_{II}} \right), \quad (4)$$

где Q , Q_{IRS} и J , J_{IRS} – переменные параметры для определения мощности сил контактного трения, препятствующих вращательному движению пресс-иглы на цилиндрических и конусных областях предполагаемого очага деформации.

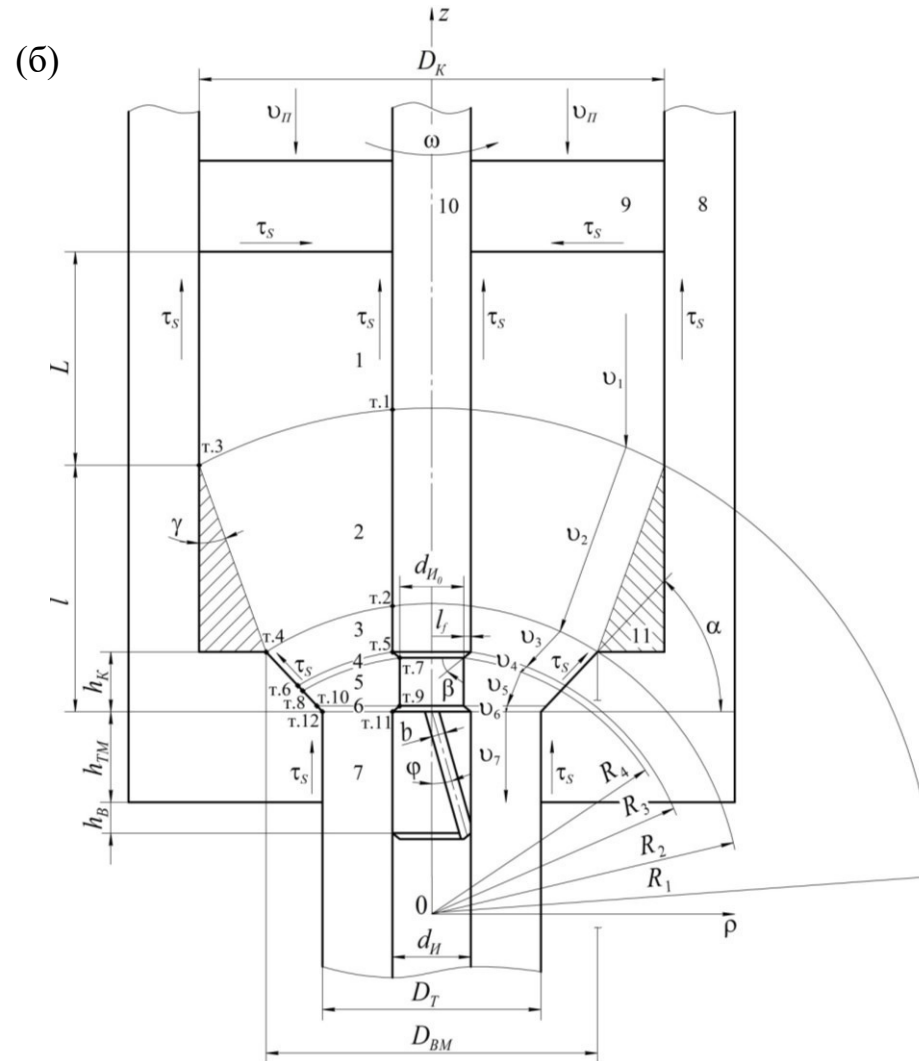
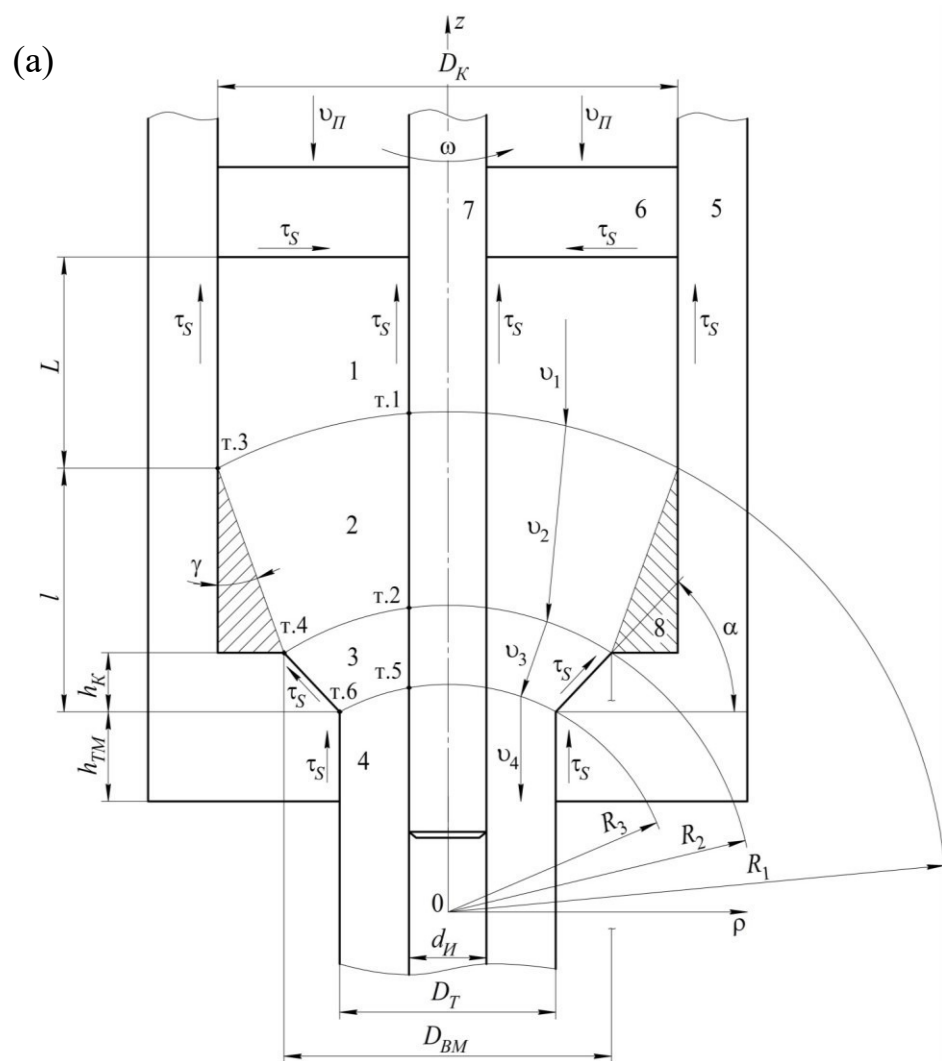


Рис. 7. Расчетные схемы процесса прессования труб с применением вращательного движения пресс-иглы:

(а) – гладкостенная труба; (б) – профильная труба с винтовым оребрением внутренней поверхности

В среде «Mathcad» проведено численное исследование разработанных математических моделей. Так, например, с использованием заданных значений определяющих параметров и расчетных значений параметров отклика получены графические зависимости максимального усилия прессования труб из стали 20 и момента от угловой скорости вращения пресс-иглы (Рис. 8).

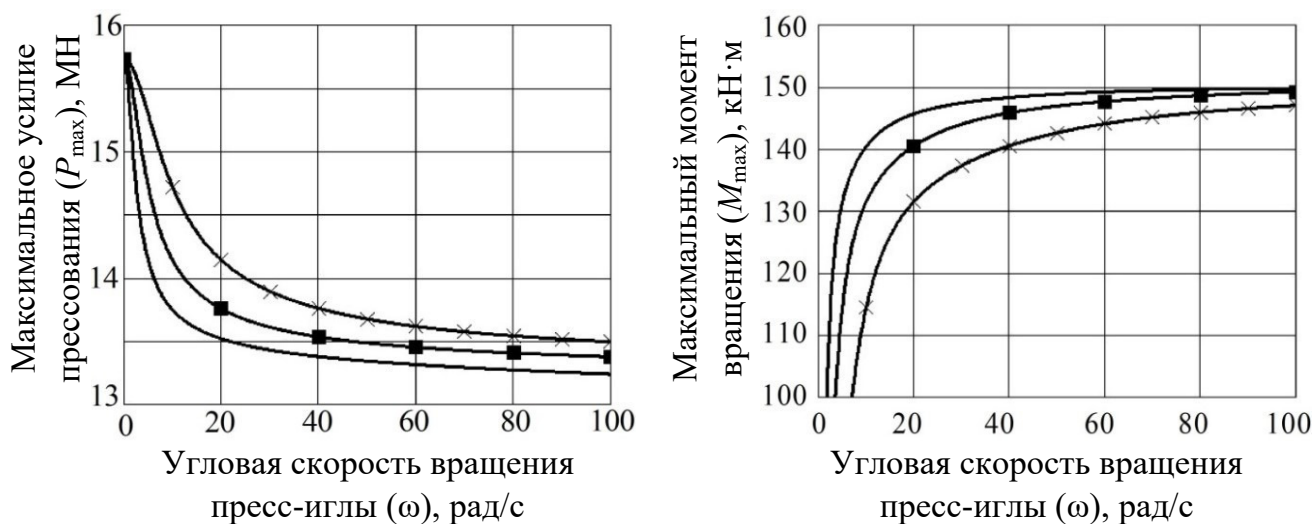


Рис. 8. Зависимости расчетных максимальных значений усилия прессования и момента от угловой скорости вращения пресс-иглы при скорости прессования:
— 75 мм/с; ■ 150 мм/с; × 300 мм/с

Таким образом, определены энергосиловые зависимости процесса, обеспечивающие снижение усилия прессования гладкостенных труб до 31,0%.

В свою очередь, с применением МКЭ, реализованного в программе QForm 2D/3D, теоретически обоснованы рациональные геометрические параметры профилировки прессового инструмента, предназначенного для изготовления профильных труб с винтовым оребрением внутренней поверхности. Полученные закономерности использованы при разработке методики и программы для автоматизированного расчета профилировки инструмента и режимов прессования.

Глава 3 содержит результаты физического моделирования процессов прошивки, экспандирования и прессования труб из свинца и оценку величины относительной ошибки математических моделей. Определены действующие в процессе прессования силы трения, представлены результаты экспериментальных исследований горячей и холодной деформации труднодеформируемых сплавов при изготовлении труб по схеме: «горячее прессование – холодная прокатка».

Экспериментальным исследованием формоизменения образцов-заготовок при экспандировании и прошивке по предложенным схемам (Рис. 1, а, г) подтверждена возможность получения образцов-гильз с формой торца, соответствующей заходному коническому отверстию матрицы.

С целью определения рациональной профилировки матриц изготавливались образцы труб размерами 10,0×2,5 мм. На Рис. 9 представлена эмпирическая зависимость изменения максимального усилия прессования образцов-труб с использованием разных матриц. Высокая степень соответствия этой модели исходным данным подтверждена величиной достоверности аппроксимированной зависимости ($R^2 = 1$).

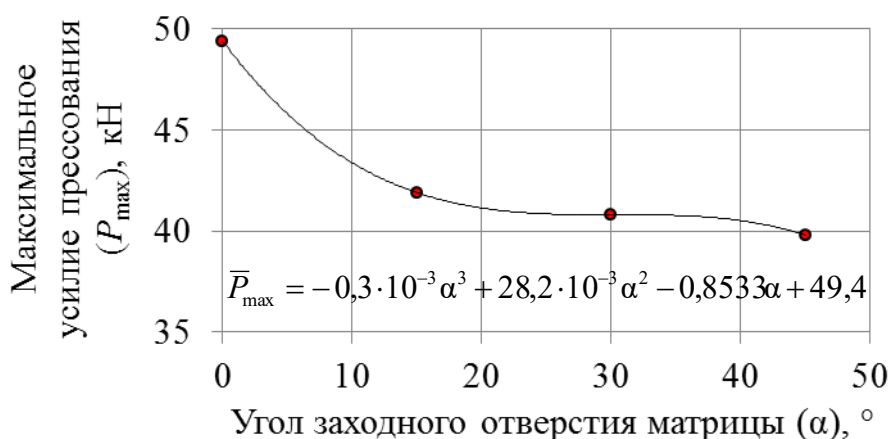


Рис. 9. Зависимость максимального усилия прессования труб от угла конусности матрицы

Проведено физическое моделирование процесса инерционного прессования труб при использовании устройств аккумуляции энергии – пружин сжатия.

Согласно представленным на Рис. 10 значениям усилия прессования, реализованные в Deform-3D математические модели показывают высокую сходимость с экспериментальными данными.

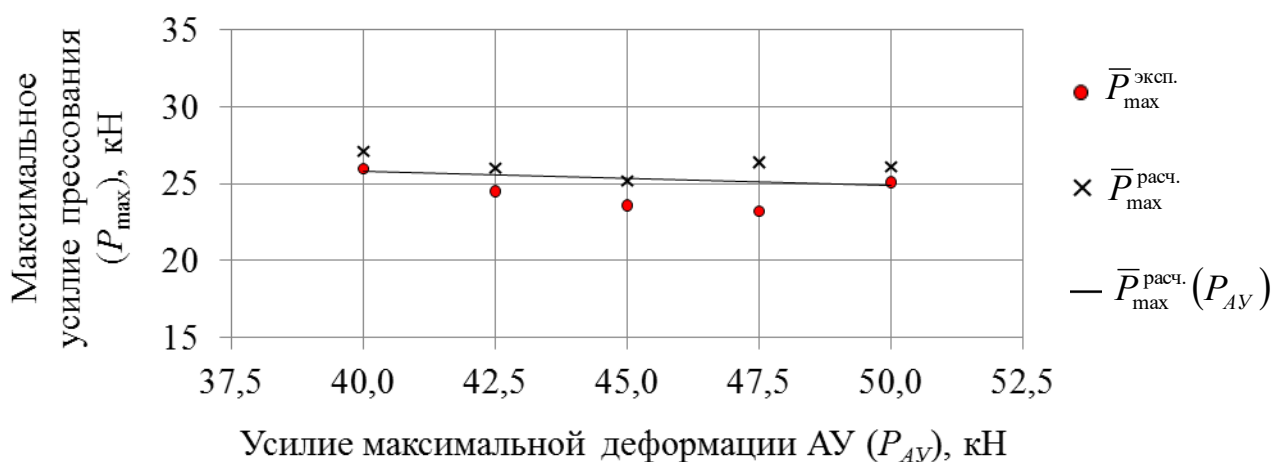


Рис. 10. Расчетные и экспериментальные значения максимального усилия прессования труб размерами 10×2,5 мм с применением АУ

Согласно Рис. 11, при проведении экспериментального исследования также проводилась оценка получения образцов труб с максимальным выходом годного путем взвешивания образцов пресс-остатков.

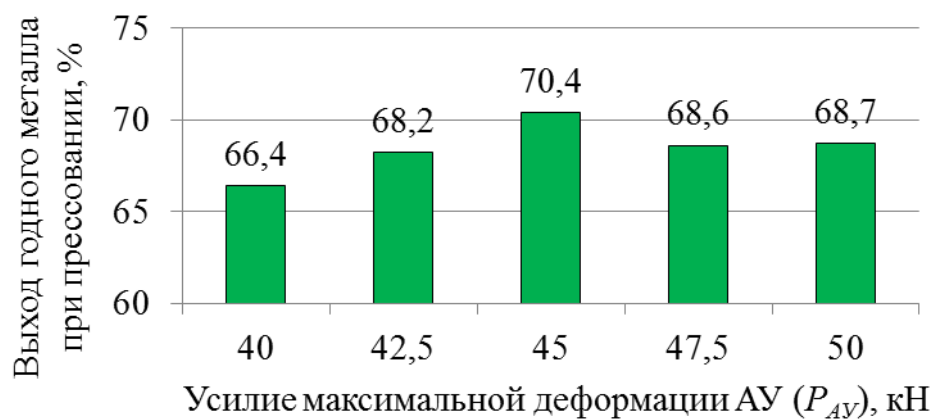


Рис. 11. Диаграмма выхода годного металла при прессовании образцов-труб с применением АУ

В свою очередь, методом координатных сеток проведено исследование характера течения металла в зависимости от различных условий трения. Установлено геометрическое подобие зон при математическом моделировании.

Расчетно-экспериментальным методом получены зависимости коэффициента трения от динамической вязкости смазочных материалов, применяемых для прессования труб (Рис. 12).

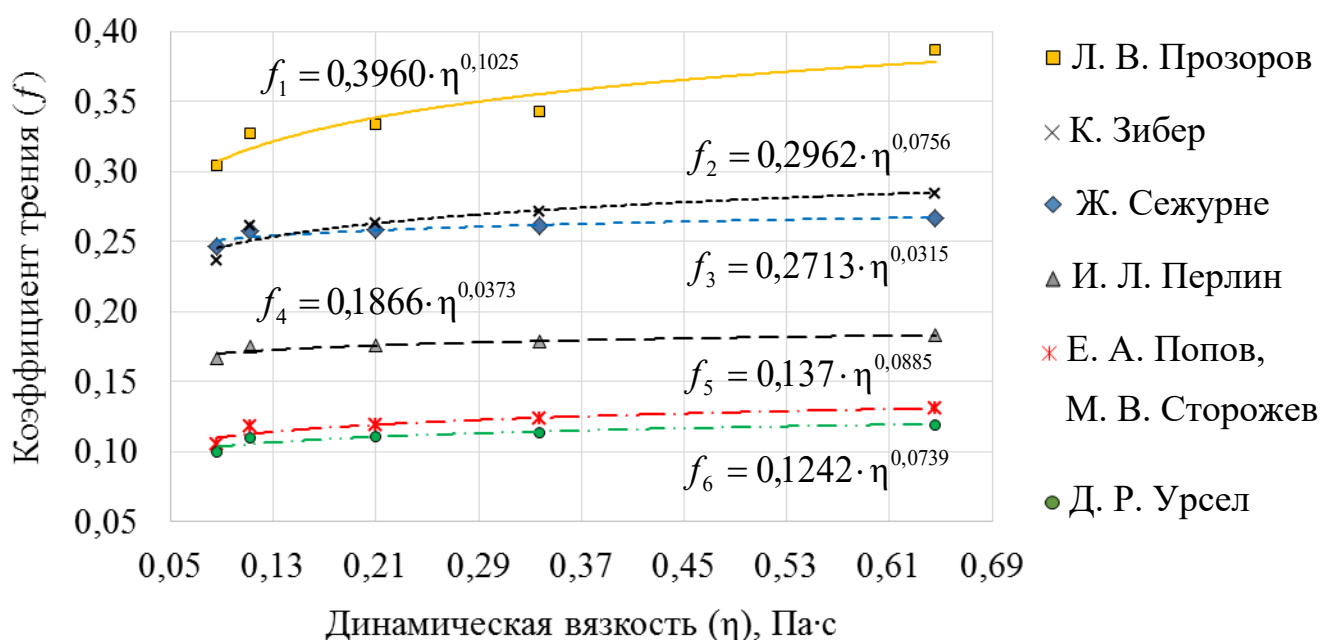


Рис. 12. Расчетно-экспериментальные зависимости коэффициента трения от динамической вязкости смазочного материала

Наибольшей схожимостью (от 8 до 11,5%) результатов отличаются значения коэффициента трения f_2 и f_3 , рассчитанные с использованием зависимостей К. Зибера и Ж. Сежурне.

Реализован комплекс физических моделей процесса прессования с принудительным вращательным движением пресс-иглы при изготовлении гладкостенных и профильных образцов-труб с внутренним винтовым оребрением.

Анализ значений усилия прессования на Рис. 13 показывает высокую сходимость разработанных математических моделей (1) и (3) с экспериментальными данными.

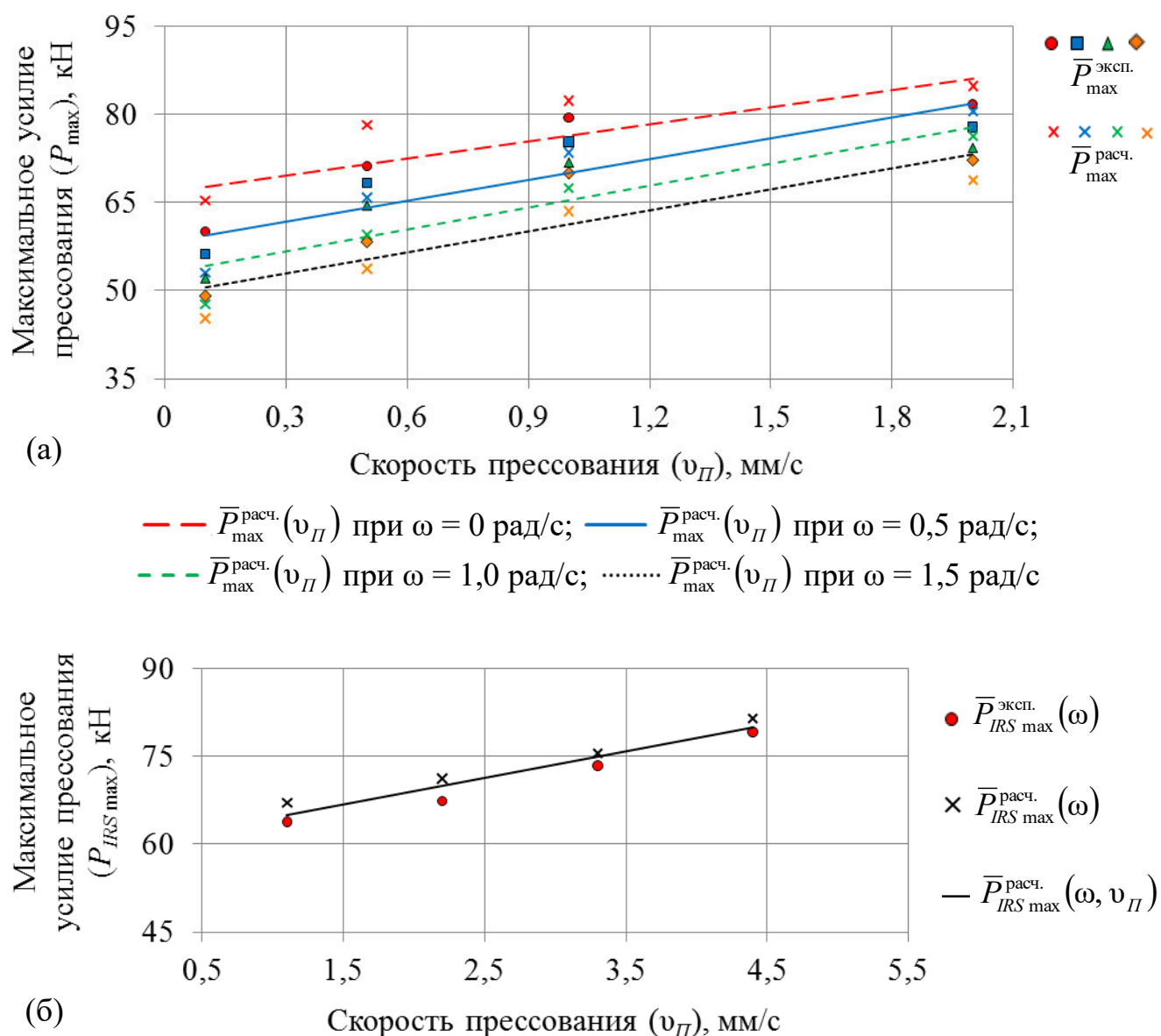


Рис. 13. Расчетные и экспериментальные значения максимального усилия прессования труб размерами $10 \times 2,0$ мм: (а) – гладкостенные; (б) – профильные

Некоторые результаты пластометрических исследований трубных заготовок из хромоникелевого (110CrNi) и титанового (Ti-3Al-2.5V) сплавов, полученные с применением комплекса «Gleeble 3800», приведены на Рис. 14, 15.

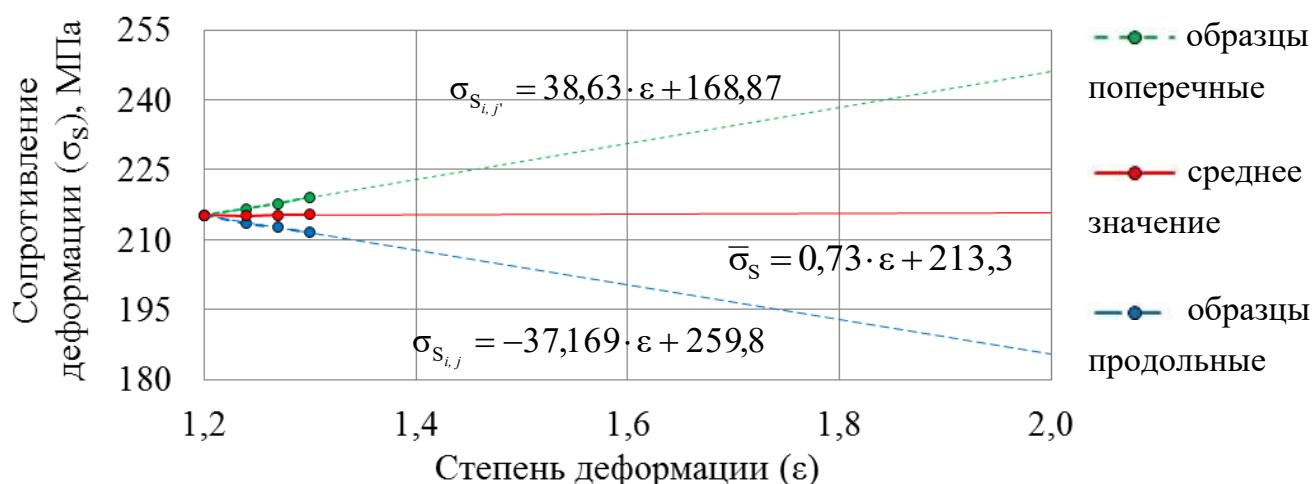


Рис. 14. Прогнозирование изменения величины сопротивления деформации заготовок с величиной укова 2,3 из сплава 110CrNi (аналог – ХН30МДБ)

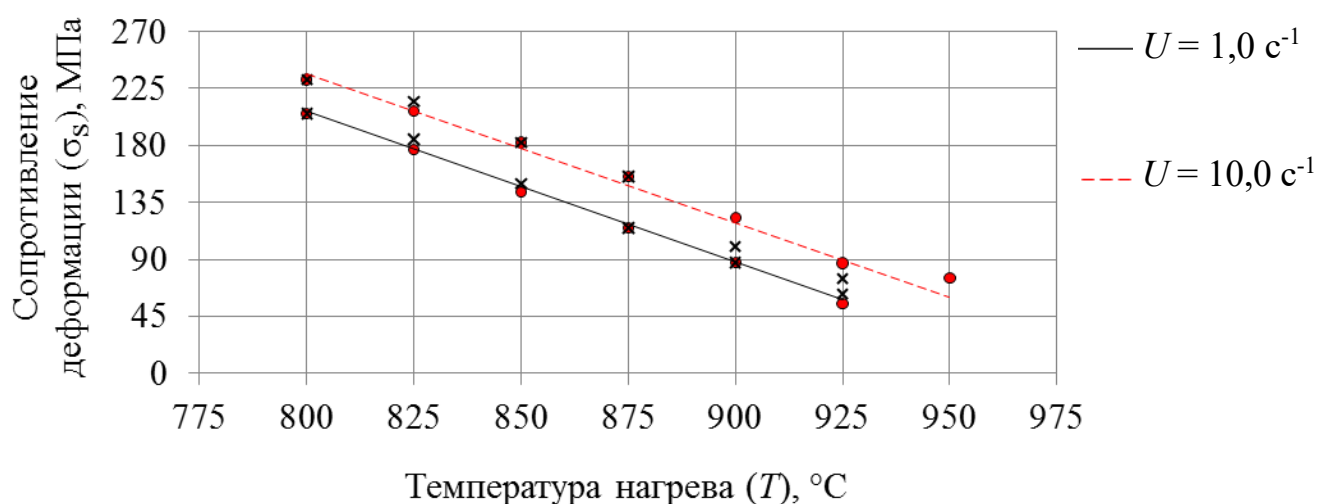


Рис. 15. Зависимость сопротивления деформации от температуры нагрева продольных (x) и поперечных (•) образцов из титанового сплава Ti-3Al-2.5V

Проведена сравнительная оценка силовых параметров процесса прессования труб размерами: 108,0×11,5 и 146,0×30,0 мм из сплава 110CrNi, 90,0×20,0 и 90,0×23,5 мм из титанового сплава Ti-3Al-2.5V, а также – оценка влияния степени холодной деформации образцов (8,43–54,9%) на механические свойства. Показана применимость экспериментальных данных сопротивления деформации и предела текучести для прогнозирования технологических режимов горячего прессования и холодной прокатки труб.

Глава 4 посвящена описанию новых энерго- и металлосберегающих способов и устройств для прессования труб, новизна которых подтверждается патентами на изобретения и полезные модели.

Предложен новый инструмент для прошивки, использование которого обеспечивает изготовление гильз с формой передней торцевой поверхности, соответствующей конической профилировке матричного узла (Рис. 16, а).

Длина получаемой гильзы с передней торцевой поверхностью в форме усеченного конуса (Рис. 16, б)

определяется как: $L = L_K + L_1$, где L_K – высота торцевого конического участка гильзы: $L_K = \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha) \cdot [(D_1 - D_3) / 2]$; L_1 – длина цилиндрической части гильзы:

$$L_1 = \frac{\left(\frac{D_0}{2}\right)^2 \cdot L_0 + \left(\frac{D_2}{2}\right)^2 \cdot L_K - \frac{1}{3} L_K \cdot \left[\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 + \frac{D_1 \cdot D_3}{4} + \left(\frac{D_3}{2}\right)^2\right] - \left(\frac{D_2}{2}\right)^2 \cdot h_{\text{выд.}}}{\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_2}{2}\right)^2}, \quad (5)$$

где D_0 – диаметр заготовки; L_0 – длина заготовки; D_1 , D_2 – наружный и внутренний диаметр гильзы; D_3 – меньший диаметр переднего торца гильзы; $h_{\text{выд.}}$ – высота части металла заготовки, удаляемой при прошивке.

Для последующего прессования трубы из предварительно подготовленной гильзы в контейнере размещают матрицедержатель, сопряженный с матрицей таким образом, что поверхности их входных участков образуют единую коническую поверхность, угол образующей которой с осью симметрии матрицы составляет α . Вместе с этим, угол α образующей единой входной конической поверхности матрицедержателя и матрицы с осью симметрии матрицы равен углу образующей торцевого участка гильзы с продольной осью.

Сопряжение матрицы с матрицедержателем, обеспечивающее образование единой конической поверхности, уменьшает величину застойной зоны металла вблизи поверхности матрицы и приводит к более благоприятной схеме

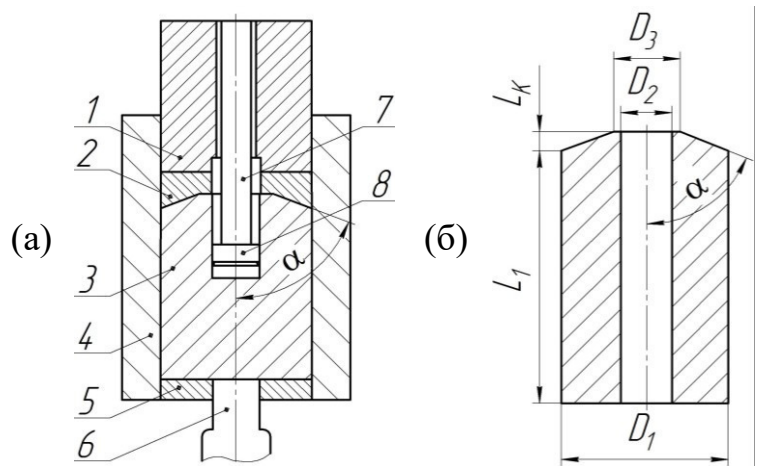


Рис. 16. Схема процесса прессовой прошивки: 1 – пресс-штемпель; 2 – шайба; 3 – заготовка; 4 – контейнер; 5 – матрица; 6, 7 – подпорная и прошивная игла; 8 – прошивной наконечник

напряженно-деформированного состояния, чем обеспечивается снижение усилия прессования труб длиной L_T :

$$L_T = \frac{\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 \cdot L_1 + \frac{1}{3} L_K \cdot \left[\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 + \frac{D_1 \cdot D_3}{4} + \left(\frac{D_3}{2}\right)^2\right] - \left(\frac{D_2}{2}\right)^2 \cdot (L_K + L_1 + h_{\text{вбл.}})}{\left(\frac{D_H}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_{BH}}{2}\right)^2}, \quad (6)$$

где D_H и D_{BH} – наружный и внутренний диаметр трубы, соответственно, мм.

С целью обеспечения стабильного поступления смазочного материала шайбы на контактную поверхность изделия и матрицы при прессовании в широком диапазоне скоростей предложено использовать смазочную шайбу, состоящую, по меньшей мере, из двух слоев материала различной вязкости (η_1, η_2) при температуре начала прессования.

Слои шайбы формируют в зависимости от скорости прессования таким образом, что при минимально заданной скорости, слой, который контактирует с торцевой поверхностью гильзы, выполняют из материала с большей вязкостью расплава ($\eta_1 < \eta_2$) при температуре начала прессования, чем у смежного слоя.

При максимально заданной скорости контактный слой выполняют из материала с меньшей вязкостью расплава ($\eta_1 > \eta_2$) при температуре начала прессования, чем у смежного слоя. Таким образом, обеспечивается поочередное размягчение слоев смазочной шайбы при изменении температуры прессуемой заготовки, в том числе за счет скоростных режимов прессования, и образование сплошного разделительного слоя на контактной поверхности изделия и матрицы.

За счет стабильного поступления смазочного материала с образованием размягченного сплошного разделительного слоя на контактной поверхности в течение всего процесса прессования обеспечивается постоянство коэффициента трения, снижение усилия прессования и выполнение требований к качественным характеристикам наружной поверхности труб за счет отсутствия налипания.

Разработан новый способ и устройство для прессования труб без пресс-остатка при одновременном снижении разности между величинами пикового и установившегося усилия. Основная конструктивная особенность предложенного устройства, заключается в размещении внутри пуансона аккумулирующего устройства (АУ), которое может быть выполнено, например, пружиной сжатия.

Пуансон передаёт усилие пресса на пресс-шайбу и заготовку, заставляя металл вытекать в отверстие матрицы. Усилие металла на конический участок пресс-иглы, который повторяет конический участок матрицы, сжимает пружину, что позволяет пресс-игле переместиться в отверстие пресс-шайбы. При уменьшении объема металла в контейнере и сил, действующих на конический участок пресс-иглы, пружина разжимается, и пресс-остаток продавливается коническим участком пресс-иглы в калибрующий участок матрицы, формируясь в трубу.

Выполнению профиля оребрения способствует рациональная профилировка прессового инструмента, предусматривающая выполнение на пресс-игле двух участков нарезов с соответствующим шагом. На рабочем участке пресс-иглы, соответствующем длине заходного участка матрицы, винтообразные нарезы выполняются с изменяющимся шагом. Ширина и глубина каждого нареза уменьшаются к калибрующему участку матрицы. Согласно схеме Рис. 17, шаг винтовых нарезов определяется как:

$$S_{\text{кон}} = \frac{S(D_M^2 - d_{\text{усл}}^2)}{D_{\text{кон}}^2 - d_{\text{ук}}^2}, \quad (7)$$

где S – шаг нарезов на рабочем участке пресс-иглы соответственно калибрующему участку матрицы;

D_M – диаметр выходного отверстия матрицы; $D_{\text{кон}}$ – диаметр заходного

отверстия матрицы; $d_{\text{усл}}$, $d_{\text{ук}}$ – условный диаметр пресс-иглы, равный диаметру круга, равновеликого по площади поперечному сечению участка пресс-иглы в заходном (L_1) и рабочем – калибрующем (L_2) участках матрицы, соответственно.

Для определения геометрических параметров профилировки пресс-иглы разработана методика, реализованная в программе автоматизированного расчета.

С целью полной очистки пресс-иглы с винтовыми нарезам от остатков стеклосмазки разработано устройство, размещаемое в многопозиционном матрицедержателе. После каждого цикла происходит позиционирование устройства соосно пресс-игле взамен матричного узла. Пресс-игла, совершая движение вдоль своей оси, контактирует с чистящими элементами, при этом барабан устройства совершает вращение и обеспечивается очистка нарез.

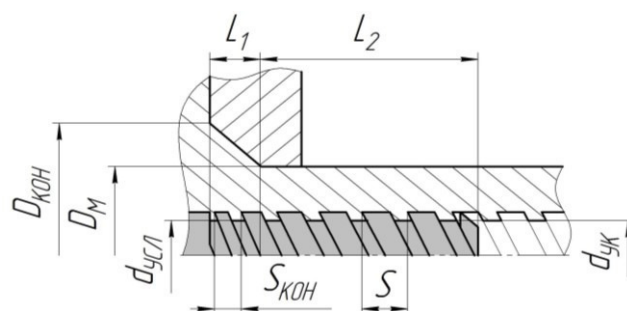


Рис. 17. Схема к расчету профилировки профильной пресс-иглы

С использованием результатов испытаний на «Gleeble 3800» по горячему осаждению образцов трубных заготовок и холодному редуцированию образцов горячепрессованных труб из хромоникелевого (110CrNi) и псевдо- α титанового (Ti-3Al-2.5V) сплавов разработаны способы изготовления бесшовных труб по схеме: «горячее прессование – холодная прокатка».

Так, например, для определения механических свойств хромоникелевого сплава 110CrNi готовых труб получена эмпирическая зависимость для определения оптимальной степени ε пластической деформации:

$$\varepsilon \cdot (18,8 - 0,13 \cdot \varepsilon) = \sigma_T - 382, \quad (8)$$

где σ_T – нормируемый предел текучести металла готовой трубы, МПа.

Предварительная пластическая деформация проводится со степенью, не более 35% за проход, что обеспечивает получение холоднодеформированных труб промежуточного размера с удовлетворительной величиной кривизны. Прокатка на стане ХПТ-90 реализуется на жидких смазках, что обеспечивает получение более высокой чистоты поверхности труб и, как следствие, повышение их качества, так как любые мелкие дефекты могут являться очагами коррозионного разрушения.

Реализация технологической схемы (Таблица 1) окончательной холодной деформации со степенью, определяемой по зависимости (8), обеспечивает выполнение требований ТУ 14-3Р-139-2014 к величине предела текучести σ_T .

Таблица 1.

Технологический маршрут изготовления труб размерами 88,9×6,45 мм из сплава 110CrNi по схеме: «горячее прессование – холодная прокатка»

Горячее прессование	Предварительная холодная деформация		Окончательная холодная деформация		
Размеры труб, мм	μ (ε , %)		Размеры трубы, мм	μ (ε , %)	σ_T , МПа
118,0×11,0 ($L = 4200$)	102,0×8,5 ($L = 6015$)	1,48 (32,5)	88,9×6,45 ($L = 8750$)	1,49 (33,1)	880,0
Примечание: μ – коэффициенты вытяжки, L – длина трубы.					

Для псевдо- α титановых сплавов превышение температуры полного полиморфного превращения T_{III} в процессе нагрева заготовок под последующее прессование и в процессе деформации приводит к необратимым последствиям в изменении фазовой структуры сплава и механических свойств готовых труб.

Согласно новому способу, горячее прессование труб из титанового сплава типа Ti-3Al-2.5V осуществляется при температуре нагрева T_H заготовки, определяемой по зависимости:

$$T_H = T_{III} - k \cdot \varepsilon \cdot v_{PP}, \quad (9)$$

где T_{III} – температура полиморфного превращения, °С; k – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние деформационного разогрева (принимается равным от 0,15 до 0,20 °С·с/мм); ε – логарифмическая степень горячей деформации; v_{PP} – скорость прессования, мм/с.

Холодную прокатку рекомендуется проводить, как показано в Таблице 2, в интервале значений степени деформации ε от 40 до 44%, что обеспечивает постепенное измельчение микроструктуры после каждого прохода и равномерное изменение механических свойств, а также выполнение требований AS 5620.

Таблица 2.

Технологический маршрут изготовления труб размерами 38,1×5,36 мм из сплава Ti-3Al-2.5V по схеме: «горячее прессование – холодная прокатка»

№ прохода (стан ХПТ)	Размеры труб, мм		Кoeffициент вытяжки (μ)	Степень деформации (ε), %
	до прокатки	после прокатки		
Обточка / расточка передельных труб размерами: 90,0×20,0 → 86,81×16,84 мм				
I (ХПТ-90)	86,8×16,84	68,00×12,00	1,75	43,0
Обточка труб размерами: 68,00×12,00 → 67,00×11,50 мм				
II (ХПТ-55)	67,00×11,50	54,00×8,00	1,73	42,0
Обточка труб размерами: 54,00×8,00 → 53,0×7,50 мм				
III (ХПТ-55)	53,0×7,50	39,5×6,06	1,68	41,0
Обточка труб размерами: 39,5×6,06 → 38,1×5,36 мм				
Примечание: после каждого прохода проводится промежуточная термическая обработка в вакууме при нагреве до 700 – 720 °С с выдержкой 120 мин. и охлаждение в муфеле.				

В Главе 5 показаны результаты производства опытно-промышленных партий горячепрессованных труб в условиях ТПЦ-2 АО «ВТЗ» с использованием новых способов и устройств, обеспечивающих уменьшение усилия прессования и изготовление профильных труб с винтовым оребрением внутренней поверхности.

С использованием инструмента новой конструкции (угол конусности рабочей части шайбы подпрессовочного штампея и заходного отверстия матричного узла 30°) на прессовой линии усилием 55,0 МН произведена опытно-промышленная партия труб размерами $219 \times 8,0$ мм из стали марки 20 по требованиям ГОСТ 8732-87.

Фактические значения максимального усилия прессования труб размерами $219 \times 8,0$ мм с применением заготовки размерами $350,0 \times 730,0$ мм из стали марки 20, прошитой в гильзу размерами $366,0 \times 215,0 \times 1065$ мм с использованием прессового инструмента новой и применяемой профилировки представлены на Рис. 18.

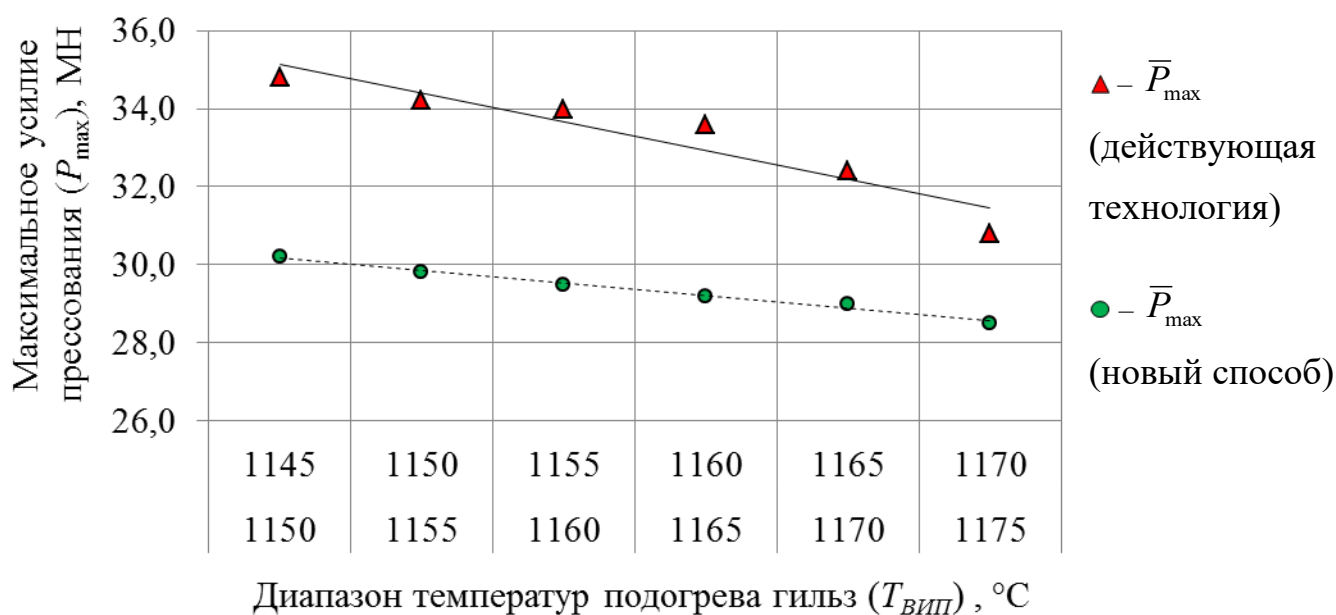


Рис. 18. Фактические значения максимального (пикового) усилия прессования труб размерами $219 \times 8,0$ мм из стали марки 20

Промышленная реализация способа прессования труб размерами $219 \times 8,0$ мм из стали марки 20 с использованием новой конфигурации прессового инструмента обеспечивает снижение максимального усилия прессования труб на 12,6%.

С использованием комбинированной стеклосмазочной шайбы, слои которой выполнены из стеклопорошков Ф-1 и Ф-4, на горизонтальном трубопрофильном прессе усилием 20,0 МН производилась опытно-промышленная партия труб размерами $60 \times 6,0$ мм из стали марки 20 по требованиям ГОСТ 8732-87.

Согласно результатам испытаний (Рис. 19) на высокотемпературном ротационном вискозиметре динамическая вязкость стеклопорошка Ф-1 при температуре 1200°C значительна ($\eta_{\text{Ф-1}} > \eta_{\text{Ф-4}}$), что обеспечивает технический эффект.

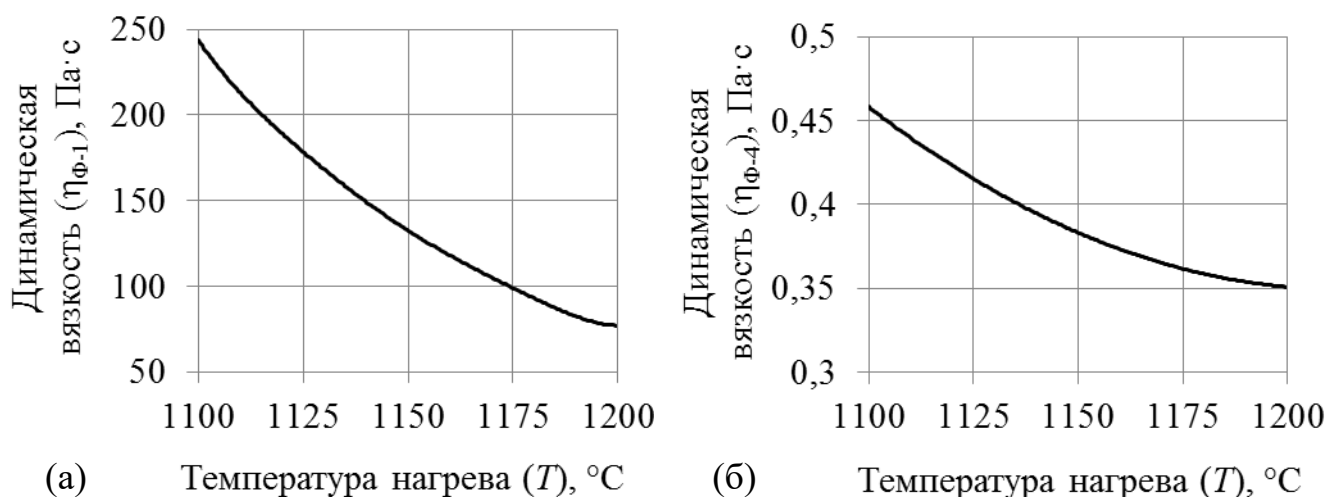


Рис. 19. Зависимость динамической вязкости стеклосмазочного материала от температуры: (а) – Φ-1: $\eta_{\Phi-1} = 76,5\text{--}245,9 \text{ Па}\cdot\text{с}$; (б) – Φ-4: $\eta_{\Phi-4} = 0,345\text{--}0,456 \text{ Па}\cdot\text{с}$

Слои комбинированной стеклосмазочной шайбы устанавливаются в направлении от матрицы к торцевой поверхности гильзы по порядку: Φ-1 (растекаемость при температуре 1140 $^{\circ}\text{C}$ – 11...18 мм) → Φ-4 (растекаемость при температуре 1140 $^{\circ}\text{C}$ – 38...42 мм).

Анализ значений максимального усилия прессования при разных температурах подогрева гильз размерами 172,0×56,0×650 мм в вертикальной индукционной печи, представленный на Рис. 20, показал снижение максимальных нагрузок на 10,6% при использовании предложенной стеклосмазочной шайбы.

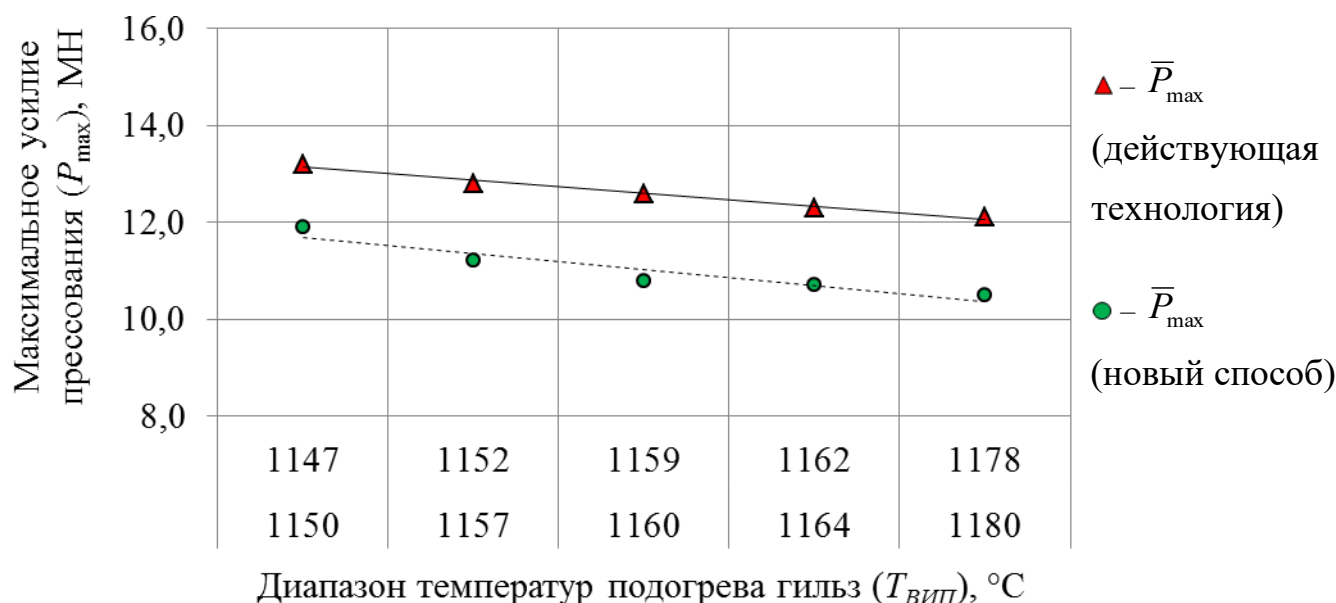


Рис. 20. Фактические значения максимального (пикового) усилия прессования труб размерами 60×6,0 мм из стали марки 20

С использованием пресс-шайбы новой конструкции (радиус скругления рабочей части 50,0 мм) на горизонтальном трубопрофильном прессе усилием 20,0 МН изготовлена опытно-промышленная партия труб размерами 45×4,0 мм из стали марки 08X18H10T по требованиям ГОСТ 9941-81.

Фактические значения максимального усилия прессования труб из гильз размерами 152,0×45,0×540 мм приведены на Рис. 21.

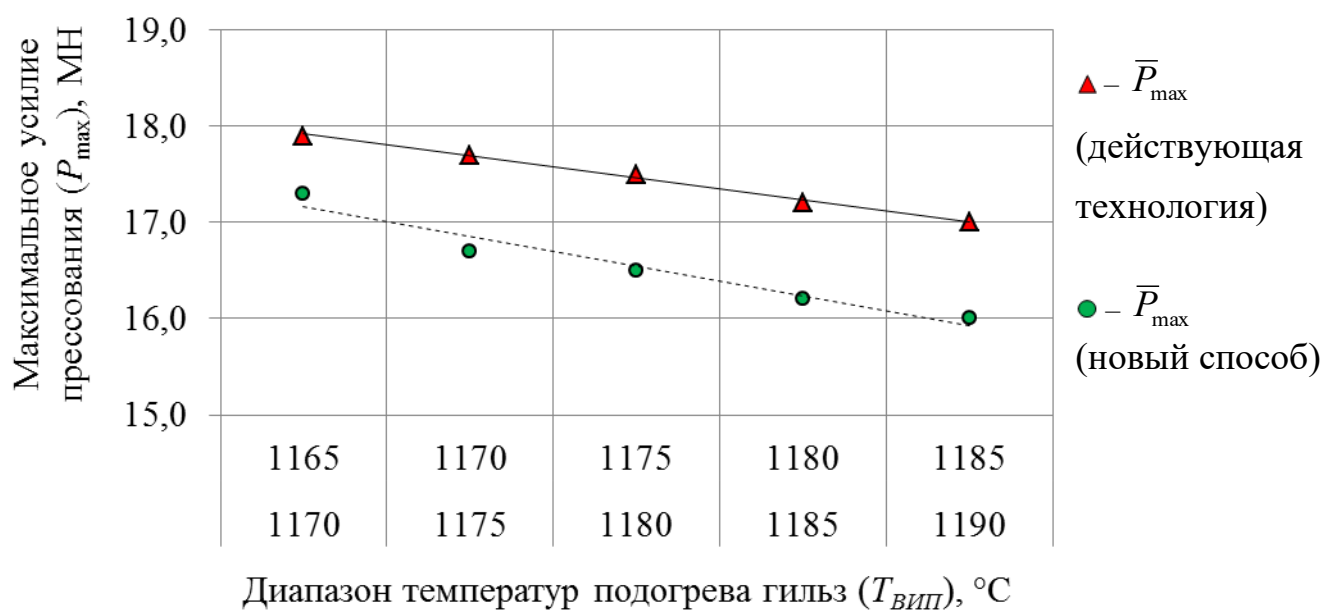


Рис. 21. Фактические значения максимального (пикового) усилия прессования труб размерами 45×4,0 мм из стали марки 08X18H10T

Промышленная реализация способа прессования труб при использовании пресс-шайбы, профилировка которой отличается радиусом скругления рабочей поверхности, обеспечивает снижение максимального усилия прессования до 5,0%.

Для выпуска нового в РФ вида трубной продукции с последующей разработкой ТУ 14-3Р-157-2018 спроектирована и реализована технология изготовления горячепрессованных труб из стали марки 20 размерами: 50×5,0 и 60×6,0 мм с восьми- и 60×6,0 мм с двенадцатишаходным оребрением с углом наклона линии винтового оребрения 20° (далее – трубы IRS: inner ribbing surface).

Для уточнения режима термической обработки проводилось металлографическое исследование поперечных образцов трубы. Исследование макроструктуры (Рис. 22) показало, что с точки зрения проработки структуры участки оребрения характеризуются благоприятным расположением волокон.

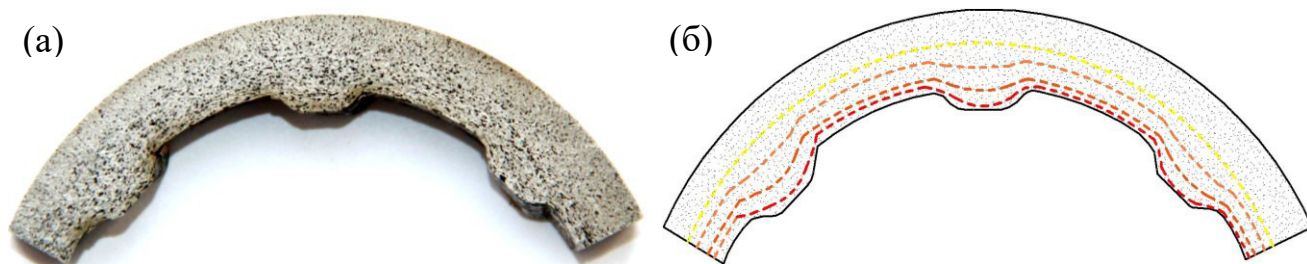


Рис. 22. Образец горячепрессованной трубы IRS: (а) – макроструктура ($\times 2$); (б) – абрис образца с характерным расположением волокон

На Рис. 23 показана микроструктура материала трубы IRS после проведения термической обработки по режиму: нормализация при температуре 920 °С, с выдержкой 10 минут и последующим охлаждением на воздухе.

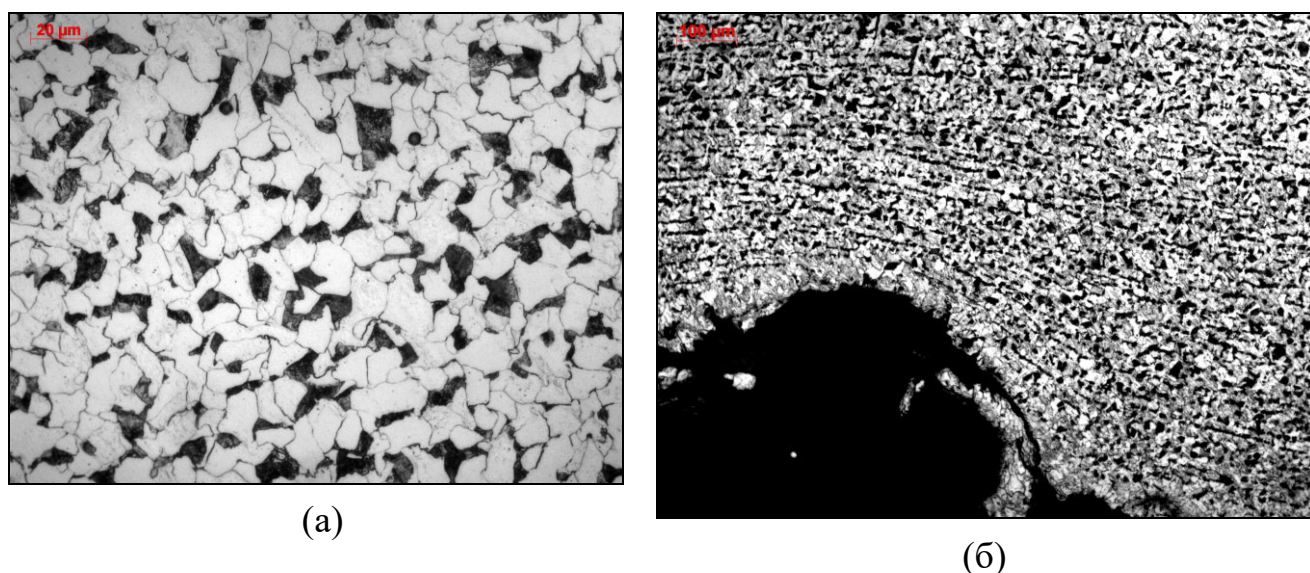


Рис. 23. Микроструктура стали марки 20 трубы IRS в области оребрения после нормализации при температуре 920 °С: (а) – $\times 500$; (б) – $\times 100$

Металлографическое исследование свидетельствует о том, что структура горячепрессованной трубы IRS отличается характерной направленностью феррито-перлитной структуры в области оребрения.

Результаты работы и заключение

1. С использованием разработанных математических моделей теоретически описаны процессы прошивки и экспандирования заготовок, прессования гладкостенных и профильных труб. Наиболее важными являются следующие научные результаты:

– теоретически обоснована возможность формоизменения торцевой поверхности заготовки за счет прошивки и экспандирования с получением гильзы, предназначенной для прессования труб с применением матричных узлов, обеспечивающих более благоприятные условия истечения деформируемого металла и снижение усилия процесса прессования труб до 15,8%;

– теоретически обоснована рациональная профилировка пресс-шайбы и определены зависимости для выбора силовых характеристик аккумулирующего устройства, обеспечивающие в совокупности снижение усилия прессования труб до 36,6% и реализацию эффекта кинематического удаления пресс-остатка;

– определены энергосиловые зависимости процесса прессования труб с вращением пресс-иглы, позволяющие снизить усилие прессования гладкостенных труб до 31,0% и прогнозировать возможность изготовления профильных труб.

2. При использовании сконструированных экспериментальных установок и трубопрессовых оснасток проведено физическое моделирование процессов прошивки, экспандирования заготовок и прессования труб. Наиболее важными научными результатами являются:

– новые схемы и силовые условия деформации заготовки в процессах экспандирования и прошивки, обеспечивающие получение рационального профиля торцевой поверхности гильзы;

– новый способ прессования труб с применением устройства аккумулирования энергии, для выбора силовых параметров которого определена эмпирическая зависимость и подтверждена возможность компенсации усилия прессования труб на 40,0% при увеличении выхода годного до 70,4%;

– изучено раздельное влияние сил трения на контактных поверхностях деформируемого металла и прессового инструмента, а также определены закономерности изменения коэффициента трения в зависимости от реологических свойств смазочных материалов, применяемых для прессования труб;

– исследован процесс прессования гладкостенных и профильных труб с принудительным вращением пресс-иглы, в котором, соответственно, подтверждена возможность снижения усилия прессования на 19,8% и формирование винтового оребрения внутренней поверхности.

3. Определены деформационные особенности хромоникелевого и псевдо-α титанового сплавов, применяемых для получения бесшовных труб по схеме:

«горячее прессование – холодная прокатка». Получены следующие научно-практические результаты:

– при заданных энергосиловых параметрах пластометрических испытаний определены истинные значения сопротивления пластической деформации сложнолегированных сплавов, выполнена оценка деформационной однородности трубных заготовок и технологической возможности горячего прессования труб из них. Для сплава Ti-3Al-2.5V получена эмпирическая зависимость определения температуры нагрева гильзы перед прессованием, учитывающая порог фазового превращения, влияние степени и скорости прессования на деформационный разогрев, и с ее применением реализована новая технология изготовления в производственных условиях ПАО «ТМК» горяче- и холоднодеформированных труб для ПАО «Корпорация ВСППО-АВИСМА» по требованиям AS 5620;

– получены новые эмпирические зависимости для определения механических свойств исследуемых сплавов в зависимости от степени холодной деформации, использование которых для прогнозирования деформационного упрочнения хромоникелевого сплава в производственных условиях ПАО «ТМК» обеспечило изготовление труб по требованиям ТУ 14-3Р-139-2014.

4. На уровне новых технических решений решена задача снижения усилия прессования при уменьшении расхода металла, повышении стойкости инструмента и точности размеров гладкостенных и профильных труб с винтовым оребрением внутренней поверхности, а также повышения производительности.

5. Разработаны и внедрены в действующее трубопрессовое производство АО «ВТЗ» новые энерго- и металлосберегающие технологии и оборудование для производства горячепрессованных гладкостенных и профильных труб. Важными практическими результатами реализации новых технологий и оборудования, обобщенных технологическими регламентами и атласами конструкций, применительно ко всему сортаменту труб, производимых ТПЦ-2, являются:

– уменьшение значений пикового и установившегося усилия прессования труб на 11,6–12,6% за счет использования матричного узла, отличного углом конусности заходного участка, поверхность которого соответствует торцевой поверхности гильзы, изготавливаемой способом прошивки на вертикальном прессе, обеспечивает снижение расходного коэффициента металла до 7,0%;

- уменьшение значения пикового усилия прессования труб на 10,6% за счет применения комбинированных стеклосмазочных шайб, слои которой выполнены из материалов с различными значениями вязкости расплавов и располагаются относительно матрицы в зависимости от скоростных режимов горячей деформации, обеспечивает снижение расходного коэффициента металла до 5,0%;
- уменьшение значения пикового усилия прессования на 5,0% за счет применения пресс-шайбы, отличающейся радиусом скругления рабочей поверхности, обеспечивает снижение расходного коэффициента металла до 6,0%;
- изготовление опытно-промышленных партий нового для отечественной промышленности вида трубной продукции, на основе чего впервые в РФ созданы технические требования ТУ 14-ЗР-157-2018 на горячепрессованные стальные трубы с винтовым оребрением внутренней поверхности для паровых котлов.

Библиографическое описание публикаций автора по теме диссертационного исследования

Монография

Конструирование прессового инструмента / Я.И. Космацкий, Б.В. Баричко, Н.В. Фокин, А.М. Зубков. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2016. 211 с. (10,4 п.л. / 6,1 п.л.).

Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ:

1. Исследование свойств центробежнолитой трубной заготовки из стали 08Х18Н10Т / Я.И. Космацкий [и др.] // Металлург. 2013. № 4. С. 59–62. (0,25 п.л. / 0,1 п.л.).

2. Оценка технологической возможности изготовления горячепрессованных труб из центробежнолитой трубной заготовки стали AISI 321 / Я.И. Космацкий [и др.] // Бюл. науч.-техн. и экон. информ. «Черная металлургия». 2014. № 1 (1369). С. 58–63 (0,35 п.л. / 0,15 п.л.).

3. Космацкий Я.И., Перевозчиков Д.В. Определение геометрических параметров профилировки инструмента при изготовлении труб с внутренними винтовыми нарезками прессованием // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2014. Вып. 1, Т. 14. С. 80–84. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.).

4. Моделирование процесса прессования труб с использованием устройства инерционной выпрессовки пресс-остатка / Я.И. Космацкий [и др.] // Сталь. 2014. Вып. 11. С. 46–49. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).

5. Баричко Б.В., Космацкий Я.И., Ахмедьянов А.М. Исследование деформационной способности трубных заготовок из труднодеформируемого сплава // Бюл. науч.-техн. и экон. информ. «Черная металлургия». 2015. № 9 (1389). С. 68–73. (0,35 п.л. / 0,15 п.л.).
6. Компьютерное моделирование формоизменения заготовок при экспандировании и прошивке / Я.И. Космацкий [и др.] // Известия ВолгГТУ. 2015. № 12. С. 92–97. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).
7. Космацкий Я.И., Фокин Н.В., Баричко Б.В. Экспериментальное исследование формоизменения торцевой поверхности гильзы при прошивке и экспандировании // Сталь. 2016. Вып. 1. С. 46 – 49. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).
8. Экспериментальное определение температурных параметров для оценки возможности изготовления горячепрессованных труб из сплава Ti-3Al-2,5V / Я.И. Космацкий [и др.] // Металлург. 2016. № 9. С. 83–87. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).
9. Исследование деформационной способности титанового сплава Ti-3Al-2,5V и оценка технологической возможности изготовления горячепрессованных труб из него / Я.И. Космацкий [и др.] // Титан. 2016. № 2. С. 18–22. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.).
10. Космацкий Я.И. Влияние профилировки инструмента на ЭСП процесса прессования труб // Известия ВолгГТУ. 2016. № 2. С. 68–75. (0,3 п.л.).
11. Космацкий Я.И. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса прессования труб с винтообразным оребрением внутренней поверхности // Производство проката. 2016. № 11. С. 28–34. (0,4 п.л.).
12. Космацкий Я.И. Оценка результатов освоения технологии прессования труб с винтообразным оребрением внутренней поверхности // Сталь. 2016. Вып. 12. С. 46–50. (0,2 п.л.).
13. Космацкий Я.И. Математическое описание выполнения винтового оребрения внутренней поверхности труб в процессе прессования // Производство проката. 2017. № 1. С. 19–24. (0,3 п.л.).
14. Освоение технологии производства труб из сложнолегированного сплава «ТМК-С» / Я.И. Космацкий [и др.] // Черные металлы. 2017. № 3. С. 30–34. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).
15. Космацкий Я.И. Расчетно-экспериментальный метод определения зависимостей коэффициента трения от реологических свойств смазочных материалов при прессовании труб // Сталь. 2017. Вып. 11. С. 31–36. (0,25 п.л.).

Патенты на изобретения, полезную модель и свидетельства о государственной регистрации программ и базы данных для ЭВМ:

1. Пат. 2535831 РФ, МПК В 21 В 17/00, В 21 С 23/08, В 21 В 25/02. Способ прессования полых профилей и устройство для его осуществления / Я.И. Космацкий, А.В. Выдрин, Б.В. Баричко и др. – № 2013133135/02; заявл. 16.07.2013; опубл. 20.12.2014, Бюл. № 35. – 8 с.

2. Пат. 2611634 РФ, МПК В 21 С 23/08 (2006.01), В 21 С 25/00 (2006.01). Инструмент для прошивки заготовки под прессование / Я.И. Космацкий, А.В. Выдрин, Б.В. Баричко и др. – № 2015131383; заявл. 28.07.2015; опубл. 28.02.2017, Бюл. № 7. – 8 с.

3. Пат. 2602927 РФ, МПК В 21 С 23/32 (2014.01). Смазочная шайба для прессования изделий и способ прессования с применением шайбы / Я.И. Космацкий, В.И. Кузнецов, Б.В. Баричко и др. – № 2015119474; заявл. 22.05.2015; опубл. 20.11.2016, Бюл. № 32. – 7 с.

4. Пат. 2554261 РФ, МПК В21С 37/20 (2006.01). Устройство для изготовления труб с внутренним винтообразным оребрением / Я.И. Космацкий, А.В. Выдрин, Б.В. Баричко. – № 2014111402/02; заявл. 25.03.2014; опубл. 27.06.2015, Бюл. № 18. – 8 с.

5. Пат. 184647 РФ, МПК В08В 1/04 (2006.01). Устройство для очистки поверхности пресс-иглы с винтовыми нарезами / Я.И. Космацкий, Е.А. Алюшкаев, Б.В. Баричко и др. – № 2018129847; заявл. 15.08.2018; опубл. 02.11.2018, Бюл. № 31. – 8 с.

6. Пат. 2620420 РФ, МПК В 21 В 21/00, В 22 С 38/38. Способ изготовления бесшовных холоднодеформированных высокопрочных труб из хромоникелевого сплава / И.Ю. Пышминцев, А.К. Беломестнов, Я.И. Космацкий и др. – № 2016102465; заявл. 19.01.2016; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 15. – 6 с.

7. Пат. 2661125 РФ, МПК С 22 F 1/18, В 21 В 3/00. Способ изготовления бесшовных холоднодеформированных труб из титанового сплава типа Ti-3Al-2,5V / И.Ю. Пышминцев, Я.И. Космацкий, Е.А. Филяева и др. – № 2017116114; заявл. 10.05.2017; опубл. 11.07.2018, Бюл. № 20. – 10 с.

8. Свид. о гос. регистр. программ для ЭВМ № 2015616366. Программный комплекс «Sigma RM» для определения сопротивления горячей пластической деформации и максимального усилия прессования труб из различных металлов и сплавов / Б.В. Баричко, А.В. Баричко, Я.И. Космацкий и др. – № 2015613161; заявл. 20.04.2015; опубл. 20.07.2015. – 1 с.

9. Свид. о гос. регистр. программ для ЭВМ № 2014616235. Программный комплекс для определения параметров прессования труб с внутренним винтообразным оребрением / Я.И. Космацкий, Д.В. Перевозчиков. – № 2014613894; заявл. 29.04.2014; опублик. 20.07.2014. – 1 с.

10. Свид. о гос. регистр. баз данных № 2015621375. База данных для изготовления труб из высоколегированных сталей и сплавов методом горячего прессования («STEX») / Я.И. Космацкий, Б.В. Баричко, Н.В. Фокин и др. – № 2015620961; заявл. 21.07.2015; опублик. 20.10.2015. – 1 с.

Другие публикации:

1. Оценка технической возможности снижения усилия прессования труб в условиях ТПЦ-2 АО «ВТЗ» за счет применения новых технических решений / Я.И. Космацкий [и др.] // Труды XXII междунар. науч.-техн. конф. «Трубы-2016»: сб. науч. трудов. Челябинск: РосНИТИ, 2016. Ч. 2. С. 231–237. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).

2. Проектирование технологии изготовления труб на основе изучения деформационных особенностей сплава Ti-3Al-2.5V / Я.И. Космацкий [и др.] // Тезисы докладов междунар. конф. «Материалы и технологии для Арктики». – СПб.: НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 2017. С. 78–79. (0,13 п.л. / 0,1 п.л.).

3. Космацкий Я.И. Разработка энерго- и ресурсосберегающих технологий производства горячепрессованных труб нового сортамента за счет совершенствования теоретических основ процесса прессования и создания новых способов и устройств // Науч.-техн. конф. молодых работников Корпорации ВСМПО-АВИСМА: материалы науч.-техн. конф. Верхняя Салда: ВСМПО-АВИСМА, 2017. С. 46–56. (0,6 п.л.).

4. Experimental study of pipes extrusion process by using method of coordinate grids / Ya.Ig. Kosmatskiy [et al.] // Journal of materials science research. Published by Canadian Center of Science and Education. 2018. Vol. 7. No. 3. P. 58–68. (0,5 п.л. / 0,35 п.л.).

5. Горячепрессованные трубы с винтовым оребрением внутренней поверхности для паровых котлов: технология и оборудование, технические требования и себестоимость производства / Я.И. Космацкий [и др.] // Сборник докладов XI Всероссийской конференции «Реконструкция энергетики». Москва: ИТЕХЭКО, 2019. С. 45–48. (0,16 п.л. / 0,1 п.л.).

6. Improving of manufacturing of hot-extruded pipes from Ni-based alloys / Ya.Ig. Kosmatskiy [et al.] // ACSM: International Information and Engineering Technology Association (ИИТА). 2020. Vol. 44. No. 2. pp. 79–84. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

Космацкий Ярослав Игоревич

СОЗДАНИЕ ЭНЕРГО- И МЕТАЛЛОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ И
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГЛАДКОСТЕННЫХ И
ПРОФИЛЬНЫХ ГОРЯЧЕПРЕССОВАННЫХ ТРУБ

2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени доктора
технических наук

Издательский центр Московского государственного технического университета
им. Н. Э. Баумана

Подписано в печать ____ . ____ .2021. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 2,1. Уч.-изд. л. 2. Тираж 70 экз. Заказ № ____.

Отпечатано в типографии Издательского центра МГТУ им. Н. Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5