

На правах рукописи



Комаров Роман Сергеевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИИ МЕТАЛЛОВ
ПРИ ВЫСОКИХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЯХ С ЦЕЛЬЮ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО
ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ**

Специальность

05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2020 г.

Работа выполнена на кафедре «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: - **Федоров Анатолий Александрович**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: - **Лавриненко Юрий Андреевич**,
доктор технических наук, доцент, Государственный
научный центр РФ ФГУП «НАМИ», заведующий
отделом стандартизации продукции АМТС, г. Москва
- **Петров Павел Александрович**,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Московский политехнический университет», зав.
кафедрой «Обработка материалов давлением и
аддитивные технологии», г. Москва

Ведущая организация - ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный
авиационный технический университет имени П.А.
Соловьева», г. Рыбинск

Защита диссертации состоится 28 декабря 2020 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.16 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская, д.3, аудитория № 523А.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета и по электронной почте paltievichar@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте <https://mai.ru/events/defence/>.

Автореферат диссертации разослан « ___ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
Д 212.125.16, к.т.н., доцент



Палтиевич А.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Создание новых и совершенствование существующих технологических процессов обработки металлов давлением (ОМД) основано на математическом моделировании и вычислительном эксперименте, позволяющих получить необходимую информацию о процессе и использовать ее для оптимизации технологических параметров и управления качеством формируемых изделий. На точность решения влияет полный набор исходных данных и, прежде всего, качество реологических уравнений, в состав которых входят уравнения взаимосвязи сопротивления деформации (σ_s) и предельной пластичности (A_p) со степенью (ε), скоростью (ξ), температурой (θ) деформации и показателем напряженного состояния (k). От качества этих уравнений зависит степень универсальности математических моделей, которые должны обеспечивать адекватность, точность и экономичность расчетов.

Известно, что сведения по определению σ_s и A_p металлов получают в результате исследований, проводимых с использованием кулачковых и торсионных пластометров по различным законам развития деформации во времени. Однако, указанные пластометры позволяют проводить испытания при k не ниже $-0,58$, а диаграммы σ_s и A_p строят экстраполяцией экспериментальных данных. Реальные же процессы ОМД осуществляют при значительных отрицательных k (менее $-0,58$), обеспечить которые при испытаниях на кулачковых и торсионных пластометрах невозможно.

До настоящего времени не существует методов определения σ_s и A_p металлов, обеспечивающих широкий диапазон однородных деформаций при испытаниях. В этой связи новые возможности открывают методы испытаний с использованием пластометров высокого давления (ПВД). Сочетание новых конструкций образцов и ПВД позволит обеспечить достижение однородной деформации образцов до величин $65 \div 75 \%$ и получить, таким образом, значения σ_s и A_p соответствующие области отрицательных значений k ($-0,58 \div -3,6$), что является важной актуальной задачей исследования, которая позволит усовершенствовать реологические уравнения, разработать новые и пересмотреть существующие процессы пластического формоизменения.

Цель исследований - установление закономерностей взаимосвязи сопротивления деформации и предельной пластичности металлов со степенью, скоростью, температурой деформации и показателем напряженного состояния имеющими место в процессах ОМД, разработка и внедрение, на основе экспериментального исследования, нового технологического процесса изготовления биметаллических труб ВТбс÷1201 и

совершенствование технологии холодной прокатки шестигранных прутков из титанового сплава ВТ16.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать пластометр высокого давления, математические модели и методику испытаний образцов на растяжение и сжатие связывающие скорость деформирования и скорость деформации, позволяющие рассчитывать конструкцию вспомогательного образца, обеспечивающего постоянство скорости деформации при испытаниях от $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ до $9 \cdot 10^1 \text{ с}^{-1}$, показателе напряженного состояния от $-0,58$ до $-3,6$ и температуре от 293 К до 1073 К, имеющих место для основных процессов ОМД.

2. Путем численного моделирования и экспериментально разработать образец для испытаний на сжатие в пластометре высокого давления, обеспечивающий однородную деформацию до значения 65 – 75 %.

3. Путем проведения экспериментальных исследований на пластометрах высокого давления установить закономерности взаимосвязи сопротивления деформации и предельной пластичности сплавов ВТ6с, 1201 и ВТ16 с технологическими параметрами их пластического формоизменения в диапазоне показателя напряженного состояния от $-0,58$ до $-3,6$.

4. Осуществить опытно-промышленную проверку результатов исследований и оценить качество изделий, изготовленных по новым технологическим режимам:

- разработать технологию изготовления биметаллических труб ВТ6с ÷ 1201 для переходных элементов соединений деталей и узлов из разнородных металлов;

- усовершенствовать технологию холодной прокатки шестигранных прутков из титанового сплава ВТ16 для изготовления деталей крепления конструкций летательных аппаратов.

Научная новизна

- предложен новый принцип действия конструкции пластометра, который отличается от существующих тем, что исследования сопротивления деформации и предельной пластичности проводятся в контейнере высокого давления, что дает возможность варьировать степень (65 – 75 %), скоростью (от $2 \cdot 10^{-4}$ до $9 \cdot 10^1 \text{ с}^{-1}$), температурой (от 293 К до 1073 К) деформации и показателем напряженного состояния (от 0,58 до -3,6), тогда как на кулачковых и торсионных пластометрах испытания при однородной деформации проводят при показателе напряженного состояния не ниже -0,58.

- численным экспериментом доказано, что при варьировании диаметром центрального отверстия цилиндрического образца с торцевыми выточками возможно обеспечить однородную деформацию на протяжении всего цикла формоизменения (до 75 %) при испытаниях на сжатие в контейнере высокого давления.

- разработана методика, с помощью которой впервые установлена закономерность взаимосвязи сопротивления деформации и предельной пластичности с технологическими

параметрами формоизменения (температурой, степенью и скоростью деформации) при отрицательных значениях показателя напряженного состояния (от -0,58 до -3,6) на примере сплавов ВТ6с, 1201, ВТ16. Результаты исследования представлены в виде: принципиально новой конструкции пластометра высокого давления, нового образца для испытаний на сжатие и реологических уравнений для сплавов ВТ6с, 1201, ВТ16.

Практическая значимость

- на основе полученных реологических уравнений впервые разработана технология изготовления биметаллических труб ВТ6с-1201 для переходных элементов соединений деталей и узлов из разнородных металлов и усовершенствована технология холодной прокатки шестигранных прутков из титанового сплава ВТ16 для изготовления деталей крепления конструкций летательных аппаратов. Новые технологические процессы прошли промышленное опробование и подтверждены актом внедрения на предприятии ООО «Мегаметалл».

- разработаны технологические рекомендации по изготовлению биметаллических труб ВТ6с÷1201 и холодной прокатке шестигранных прутков из титанового сплава ВТ16. Технологические рекомендации утверждены на НТС ООО «Мегаметалл».

- получено четыре патента РФ на пластометр высокого давления, способы проведения испытаний и конструкцию образца для сжатия в ПВД.

- материалы научных исследований внедрены в учебный процесс при проведении учебных курсов «Теория пластичности», «Физика и техника высоких давлений», «Теория и технология гидропрессования», отражены в «Методическом руководстве к практическим занятиям» по курсу «Физика и техника высоких давлений» и подтверждены актом внедрения, утвержденным проректором МАИ по учебной работе.

Методология и методы исследований. Работа выполнена с использованием комплекса современных теоретических и экспериментальных методов: применение математического моделирования для выбора конструкции нового типа образца для испытаний; экспериментальные исследования на ПВД; построение объемных диаграмм сопротивления деформации и предельной пластичности с применением универсальной интегрированной системы Statistica.

Положения и результаты, выносимые на защиту:

- на основе математического моделирования установлена связь между скоростью деформирования и скоростью деформации образца металла при испытаниях на растяжение и сжатие на ПВД, определена конфигурация вспомогательного образца, обеспечивающая постоянство заданной скорости деформации при испытании;

- на основе современных методов механики деформируемого твердого тела осуществлено численное моделирование процесса осадки цилиндрического образца с

торцевыми выточками и отверстием, заполненным смазкой, в программе QForm 3D, предложена и запатентована конструкция нового образца для испытаний на сжатие обеспечивающего высокую однородную деформацию;

- разработан и запатентован ПВД для испытаний образцов на сжатие, методика испытаний, обеспечивающая прецизионный нагрев образцов и одновременный безинерционный контроль температуры, записи и обработки статических и кинематических параметров формоизменения характерных для основных видов ОМД;

- установлены закономерности взаимосвязи сопротивления деформации и предельной пластичности металлов с технологическими параметрами формоизменения в диапазоне высоких отрицательных значений показателя напряженного состояния ($-0,58 \div -3,6$) для ряда важных в промышленности сплавов ВТ6с, 1201 и ВТ16;

- впервые разработана технология изготовления биметаллических труб ВТ6с÷1201 для переходных элементов соединений деталей и узлов из разнородных металлов;

- усовершенствована технология холодной прокатки шестигранных прутков из титанового сплава ВТ16 для изготовления деталей крепления конструкций летательных аппаратов.

Степень достоверности результатов определяется: во-первых, адекватностью математических моделей процесса испытаний металлов на растяжение и сжатие на ПВД; во-вторых использованием современного испытательного оборудования, КИП, световой микроскопии; в третьих, результатами промышленного опробования нового технологического процесса изготовления биметаллических труб ВТ6с-1201 и усовершенствованием технологии холодной прокатки шестигранных прутков из титанового сплава ВТ16.

Апробация работы Основные положения настоящей работы доложены: на ежегодной Международной молодежной научно-технической конференции «Гагаринские чтения» (2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 г., Россия), VII Международной студенческой научно-практической конференции «Техника и технологии машиностроения» (2018 г., Россия), а также на ежегодных конференциях профессорско-преподавательского состава МАИ.

Публикации Основное содержание диссертации опубликовано в 20 научных работах, из них 4 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, 3 технологических и 1 методическая рекомендации, 4 патента РФ на изобретения.

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе, списка использованной литературы из 59 наименований и трех приложений. Изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 43 рисунка и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель, показана ее научная новизна и практическая значимость.

Первая глава содержит предпосылки к исследованию реологии металлов при высоких гидростатических давлениях.

Кулачковые пластометры позволяют проводить испытания при k не ниже $-0,58$, а диаграммы σ_s и A_p строят экстраполяцией экспериментальных данных. Реальные же процессы ОМД осуществляют при значительных отрицательных k (менее $-0,58$), обеспечить которые при испытаниях на кулачковых и торсионных пластометрах невозможно. Именно это обстоятельство объясняет тот факт, что сравнивая результаты исследований σ_s и A_p сплавов ВТ6с, 1201 и ВТ16 выполненные различными авторами установлено различие в показателях от 7 до 26 %, что является проблемой применения этих данных при разработке новых и усовершенствовании существующих технологических процессов.

На основе анализа литературный данных по теории ОМД и реологии металлов обоснован комплекс теоретических и экспериментальных методов, необходимых для достижения цели исследования и разработана обобщённая схема исследования (рис. 1).

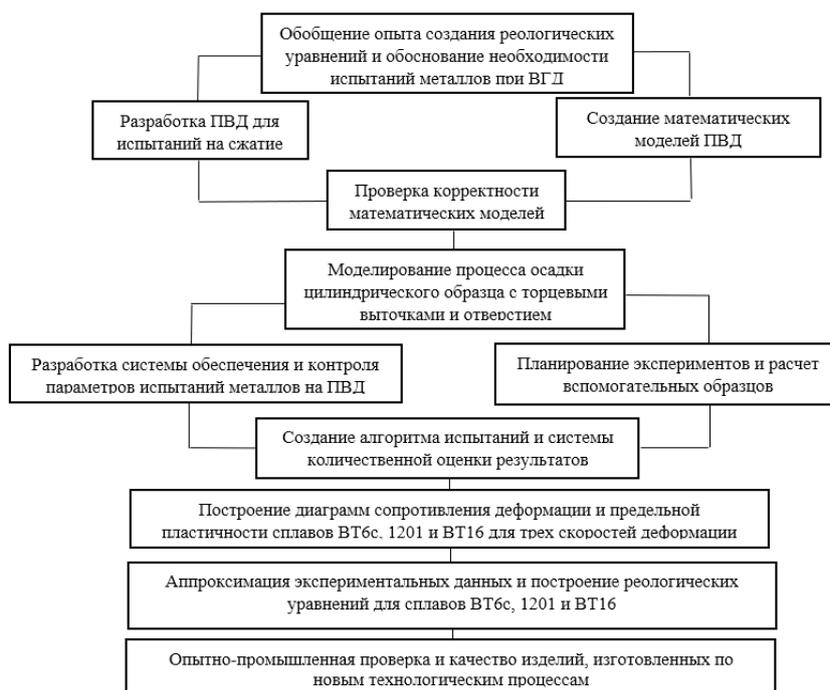


Рисунок 1 - Обобщенная схема исследования закономерностей пластического течения металлов при ВГД и совершенствования на их основе процессов ОМД

Схема включает совокупность, последовательность и взаимосвязь этапов работы, обеспечивающих создание основ построения реологических уравнений металлов и разработку расчетных технологических режимов пластического деформирования.

Во второй главе представлено математическое моделирование процессов испытаний и разработка методики исследования реологии металлов на пластометрах высокого давления (ПВД).

Предпосылками к созданию ПВД и методики исследования явились следующие обстоятельства:

- при испытаниях на кулачковых пластометрах невозможно обеспечить высокие степени однородной деформации образца на протяжении всего процесса;
- существующее оборудование для пластометрических исследований не позволяет учесть долю k ;
- для установления реологических зависимостей приходится применять различные методы экстраполяции экспериментальных сведений;
- по гипотезе Людвики, k не влияет на σ_s .

Решение проблемы создания научных основ установления закономерностей изменения σ_s и A_p применительно к разработке новых и совершенствованию существующих технологических процессов ОМД не может ограничиваться полуэмпирическим подходом, а должно базироваться на достаточно точном количественном описании реологии с учетом большого числа факторов.

Принцип работы ПВД основан на достижении ВГД в герметичном контейнере в котором находятся: матрица, вспомогательный образец, предназначенный для обеспечения постоянства скорости деформации при его выдавливании из контейнера, а также испытуемый образец на растяжение, кручение или сжатие. Достижение ВГД обеспечено сжатием рабочей среды.

Простой сменой внутренней оснастки контейнера реализуется наладка пластометра для испытания на растяжение, кручение или сжатие (Патент RU 2655043).

Для проведения испытаний необходимо выбрать рабочую среду. В условиях эксперимента среда должна удовлетворять требованиям к ньютоновской жидкости. Указанным требованиям удовлетворяют стеклографитовые рабочие среды, имеющие вязкость в пределах $10^3 \div 10^4$ П ($\lg \eta = 3 \div 4$), что достигается варьированием состава. Зависимость вязкости от состава среды представлена в виде номограммы, удобной для практического применения (рис. 2).

Поверхность номограммы аппроксимирована выражением:

$$\lg \eta = 0,631[(3,12 - 1,78 \cdot 10^{-4}\theta)] \exp[(2,410 - 2,42 \cdot 10^{-3}P) + 4,1p - 1,9].$$

Установлено, что с повышением температуры резко снижается вязкость стекла, в результате чего уменьшается вязкость стеклографитовой среды в целом.

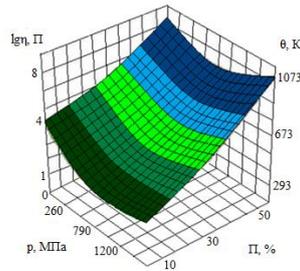


Рисунок 2 - Номограмма для расчета состава рабочей среды

Важным вопросом при испытаниях на растяжение, кручение и сжатие, является обеспечение постоянства скорости деформации. Скорость деформации образца при испытаниях на ПВД зависит от скорости деформирования и от профиля образующей вспомогательного образца. И на кулачковых пластометрах и на ПВД в качестве основного закона всегда предлагается постоянство скорости деформации образца. Для достижения таких условий деформации используется в качестве чувствительного элемента на кулачковых пластометрах - кулачок, а на ПВД - вспомогательный образец, который также как и кулачек должен специальным образом профилироваться. Для определения условий профилирования было осуществлено математическое моделирование ПВД. Математическая модель связывает кинематические параметры - скорость деформирования и скорость деформации и охватывает всю кинематическую цепь испытания. Профилирование вспомогательного образца, обеспечивающего заданные условия развития однородной деформации при испытаниях, может быть основано на законе движения, устанавливающем связь между лагранжевыми L_i и эйлеровыми E_k координатами:

$$L_i = \frac{H_{0i} E_i}{H_i} \quad (1)$$

Однородная деформация образца по закону движения (1) будет обеспечена, если соблюдается условие постоянства объема и осуществляется пропорциональное изменение диаметра и длины вспомогательного образца при объемной деформации.

Учитывая равенство нулю полной производной L_i - по времени t :

$$\frac{\partial L_i}{\partial t} + \nabla L_i \times \vec{v} = 0 \quad (2)$$

Развитие деформации во времени зависит от закона изменения h , по времени - закона нагружения:

$$h = h_0 \pm \Delta h f(t) \quad (3)$$

После вычисления по формулам Стокса, с помощью компонент тензора скоростей деформации, получим значения интенсивности скоростей деформаций:

$$\xi_u = \frac{\Delta h \chi}{h} f \quad (4)$$

Для испытаний с постоянной интенсивностью скоростей деформаций $\varepsilon_{\text{н}} = \xi$, решением дифференциального уравнения (4) с учетом (3) находим:

$$f = \pm \frac{h_0}{\Delta h} (e^{\pm \frac{\xi \times t}{\chi}} - 1) \quad (5)$$

Подстановка соотношения (5) в (4), позволяет определить закон нагружения при $\xi = \text{const}$. Этот закон можно обеспечить путем профилирования исполнительных механизмов для испытательных установок. Так, при испытаниях на кулачковых пластометрах с гидравлическим редуктором, имеющим коэффициент редукции K_p , текущий радиус r кулачка на барабане с радиусом r_6 имеет вид:

$$r = \pm k_{\text{п}} h_0 (e^{\pm \frac{\xi \times t}{\chi}} - 1) + r_6 \quad (6)$$

Таким образом, показано, что при профилировании вспомогательного образца для пластометрических испытаний, необходимо учитывать способ испытания и форму образца.

Вспомогательный образец выполнили с переменным диаметром по длине рабочей части (рис. 3).

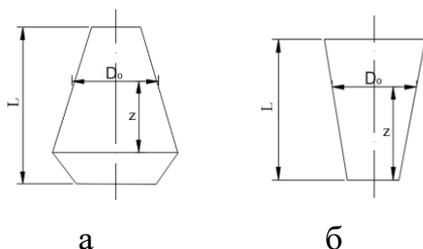


Рисунок 3 - Форма вспомогательного образца для испытаний:
а) на растяжение; б) на сжатие

При растяжении и сжатии на ПВД закон нагружения определяется переменным диаметром D_0 вспомогательного образца, выдавливаемого из канала диаметром d_M матрицы. Если скорость деформирования вспомогательного образца обозначить v_d , то текущее значение, $D_0 = D(z)$ представляется в виде:

$$D_0 = d_M \sqrt{\frac{v_d}{(h_0 \pm z) \times \xi}} \quad (7)$$

Таким образом математические модели ПВД связывают задаваемую постоянную скорость деформации ξ с переменной скоростью деформирования v_d посредством профилирования образующей вспомогательного образца D_0 .

Разработке образцов и методов испытания на сжатие посвящено ряд работ В.А. Крохи, В.Л. Колмогорова и др., в которых сделаны выводы о необходимости создания новых типов образцов для достижения при осадке высоких однородных деформаций.

В соответствии с обобщенной схемой (рис. 1), исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) цилиндрического образца высотой $H_{\text{обр}}$, с торцевыми

выточками и центральным отверстием диаметром $d_{\text{отв}}$, заполненным смазкой, при осадке, с учетом технологических параметров (скорость деформации, степень деформации, температура, смазка), путем проведения численного эксперимента, с применением конечно-элементного анализа для определения оптимальных размеров образца.

Осуществлены численные эксперименты по осадке цилиндрических образцов из титанового сплава ВТ16 с торцевыми выточками и отверстием различного диаметра, заполненным смазкой. В качестве технологического оборудования выбран гидравлический пресс усилием 1,6 МН. Расчеты проводили с учетом степени деформации образца до 65-75 % и различным составом смазки. Приемлемый результат моделирования получается тогда, когда значение коэффициента трения равно 0,099.

Реализована типовая задача об осесимметричном пластическом течении линейно-вязкой среды: при этом полагали, что инерционные силы малы, а температура не меняется во времени и в объеме. Для модели привлечена система дифференциальных уравнений теории пластичности:

$$\Delta \cdot T_{\sigma} + \rho \vec{F} = \rho \frac{d\vec{V}}{dt}, \quad (8)$$

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} + \Delta \cdot \vec{V} = 0, \quad (9)$$

$$\sigma_{ik} - \sigma \delta_{ik} = \frac{T}{H} \left(\frac{\sigma V_i}{\partial x_k} + \frac{\partial V_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \delta_{ik} \right), \quad (10)$$

$$T = T(H, \theta), \quad (11)$$

Исследован процесс осадки образцов с диаметром отверстия меньше 1 мм; от 1 до 2 мм; больше 2 мм. На рис. 4, в качестве примера, показана картина осадки образца с диаметром отверстия от 1 до 2 мм, для которого достигнута однородная деформация 75 %.

Анализ результатов исследования показал, что при отношении $\frac{d_{\text{отв}}}{H_{\text{обр}}} < \frac{1}{13}$, происходит сужение отверстия, что позволяет достичь степени однородной деформации не более 12 – 16%. При соотношении $\frac{d_{\text{отв}}}{H_{\text{обр}}}$ от $\frac{1}{13}$ до $\frac{2}{13}$, благодаря непрерывному поступлению смазки из отверстия в торцевые цилиндрические выточки образца создается гидродинамическое трение между рабочей поверхностью бойков и торцами образца в течение всего процесса сжатия, при этом повышается степень однородной деформации образца до 65 – 75 %. При отношении $\frac{d_{\text{отв}}}{H_{\text{обр}}} > \frac{2}{13}$ происходит неравномерное по высоте образца увеличение диаметра отверстия, которое принимает вид «бочки», что является признаком неоднородной деформации, степень однородной деформации при этом не превышает 8-12%.

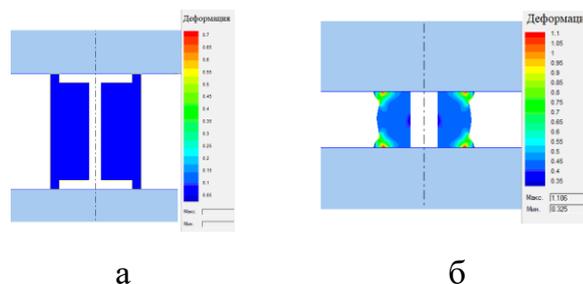


Рисунок 4 - CAD модель процесса осадки. Исходный образец (а) и образец после осадки (б)

По результатам численного моделирования предложен новый образец для испытания на сжатие (рис. 5).

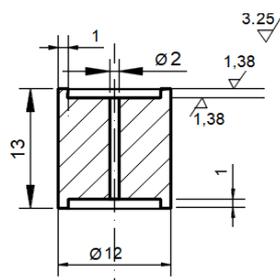


Рисунок 5 - Форма и размеры образца для испытаний на сжатие (Патент RU 2627957 с1) при высоких гидростатических давлениях

Испытания на сжатие, проведенные в работе, выполнены на образцах новой конструкции. Это позволило рассчитывать сопротивление деформации по формуле:

$$\sigma_s = \frac{P}{F}, \quad (12)$$

где: P – измеренная сила, МН; F – расчетная площадь поперечного сечения образца, м².

С учетом закона постоянства объёма образца, уменьшение его начальной высоты ($H_{обр}$) происходит пропорционально увеличению начального диаметра (d_0) в соответствии с перемещением пуансона в полости контейнера высокого давления ($h_{п}$):

$$F = \frac{0,25pd_0^2H_{обр}}{H_{обр} - h_{п}} \quad (13)$$

Расчетное значение F сравнивали с фактическим размером образца после испытания. Разность значений находилась в пределах 2 ÷ 4 %.

Качество реологических уравнений, базирующихся на изучении сложных реологических свойств, деформируемых в условиях различных режимов формоизменения металлов, основано, прежде всего, на тщательном проведении эксперимента.

Разработанная методика включает:

- подготовку образцов для испытания на растяжение (ГОСТ 1497), кручение (ГОСТ 3565-80) и сжатие (Патент RU 2627957 с1) (рис. 5);

- расчет параметров вспомогательного образца для достижения заданной постоянной скорости деформации испытуемого образца (7);
- определение состава рабочей среды (рис. 2);
- проведение эксперимента и обработки результатов испытания для трех скоростей деформации, охватывающих основные виды ОМД ($4 \cdot 10^{-2} \text{с}^{-1}$, $7 \cdot 10^1 \text{с}^{-1}$, $9 \cdot 10^1 \text{с}^{-1}$) на одном из ПВД – для растяжение, кручение или сжатие (Патент RU 2655043) в условиях однородной деформации до 75 % с показателями k , имеющими место в процессах ОМД (от 0,58 до -3,6). Температурный интервал работы ПВД от 293 до 1073 К.

ПВД в комплексе с КИП работает следующим образом (рис. 6).

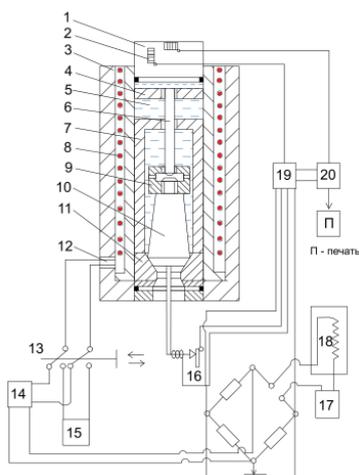


Рисунок 6 - Схема ПВД для испытаний материалов при высоких гидростатических давлениях с прецизионным нагревом образцов и одновременным безинерционным контролем температуры, записи и обработки статических и кинематических параметров испытаний

Вспомогательный образец 10 и испытуемый образец 6 ввертывают в держатель 9. На верхний конец образца 6 наворачивают упорную шайбу 4. Подготовленную таким образом оснастку для испытаний размещают в контейнере 3, причем, стенки стакана 7 опираются на верхний торец матрицы 11. После этого контейнер заполняют рабочей средой 5 и вводят уплотненный пуансон 1, перемещение которого обеспечивает повышение давления рабочей среды в контейнере. При достижении давления, необходимого для выдавливания вспомогательного образца, начинается его истечение из матрицы с возрастающей скоростью, зависящей от изменения диаметра по длине рабочей части образца, благодаря чему скорость непрерывно удлиняющегося испытуемого образца поддерживается постоянной.

Для поддержания заданной температуры испытаний в пределах $\pm 1^\circ$ применяется система двухступенчатого нагрева. Спираль 8 из сваренных между собой проволок Pt и Pt+10%Rh намотана на изолированную внешнюю поверхность опоры и окружена слоем термоизоляции. Сформированный таким образом нагреватель – термопара подсоединяется к вакуумплотным электрическим вводам 12, находящимся внутри контейнера. К этим же вводам с внешней стороны контейнера через механический прерыватель 13 попеременно,

с частотой 25-40 Гц подключается источник напряжения 14 и прибор, регистрирующий электродвижущую силу термопары 15.

Для измерения гидростатического давления в контейнере, силовых и кинематических параметров нагружения образца ПВД оснащен специальными датчиками. Сигналы от датчиков давления 2, перемещения 16, пройдя через сопротивление 17 и манганиновый манометр 18 поступают в систему сигнал-код 19 и микропроцессор 20 для расчета и выдачи на печать параметров НДС образца при испытании с последующей статистической обработкой экспериментальных данных для построения диаграмм σ_s и Λ_p .

В третьей главе установлены закономерности пластического течения металлов в температурно-скоростном диапазоне деформационных процессов.

При формулировке реологических уравнений состояния исследователь нередко сталкивается с дилеммой: точность или простота. Для задач ОМД важны оба фактора.

Планом эксперимента для каждого сплава предусмотрено проведение 36 испытаний образцов на сжатие для построения диаграмм сопротивления деформации и 36 испытаний на растяжение, кручение и сжатие для построения диаграмм предельной пластичности. Испытания охватывают температурный интервал 293 К ÷ 1073 К, показатель напряженного состояния $-0,58 \div -3,6$, три значения постоянной скорости деформации ($4 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$; $7 \cdot 10^1 \text{ с}^{-1}$; $9 \cdot 10^1 \text{ с}^{-1}$) и величину степени деформации до 75 %. Эти параметры имеют место практически для всех основных процессов ОМД.

На рис. 7, 8 представлены, в качестве примера, соответствующие диаграммы для одной из трех исследованных в работе скоростей деформации ($\xi = 7 \cdot 10^1 \text{ с}^{-1}$), построенные с помощью универсальной интегрированной системы Statistica.

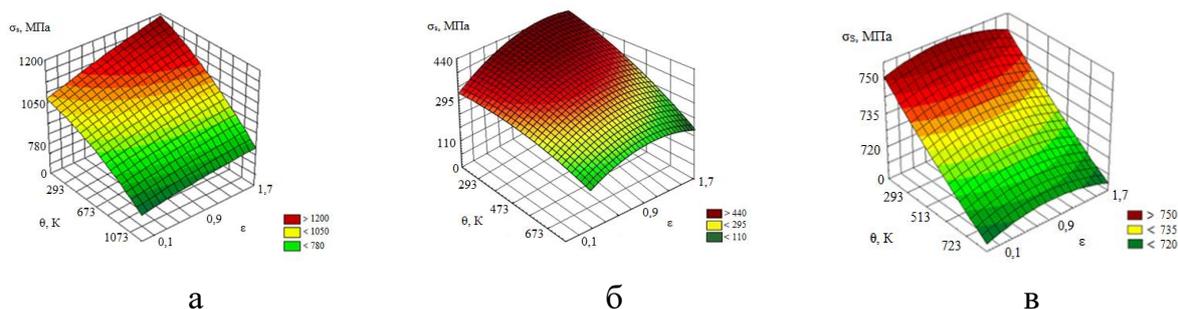


Рисунок 7 - Диаграммы сопротивления деформации: VT6с (а), 1201 (б), VT16 (в)

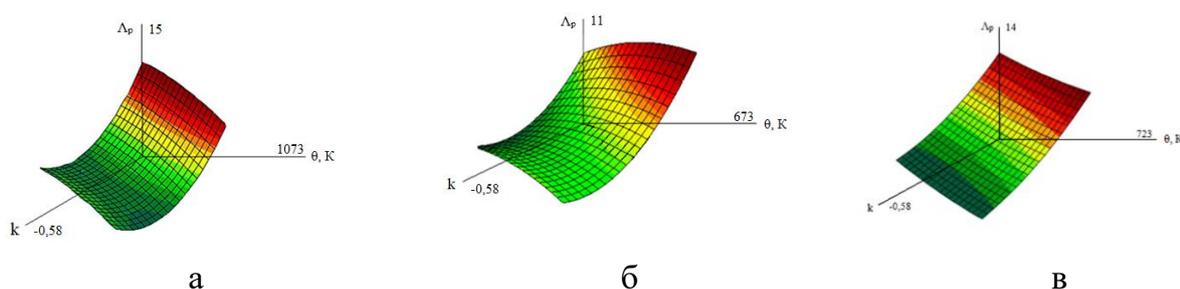


Рисунок 8 - Диаграммы предельной пластичности: VT6с (а), 1201 (б), VT16 (в)

Поверхности σ_s и A_p удовлетворительно аппроксимируются выражениями:

$$\sigma_s = a_5 \frac{\varepsilon^{a_2} \times \xi^{a_3}}{\sqrt{3}} \exp[a_4(a_1\theta + a_6)] \quad (14)$$

$$A_p = [y_{\varepsilon 2} - (y_{\varepsilon 1} - y_{\varepsilon 2})\xi] \exp\{[\varphi_{\varepsilon 2} - (\varphi_{\varepsilon 1} - \varphi_{\varepsilon 2})\xi]k\} \exp\left[\gamma_{\varepsilon} \left(\frac{\theta_{min}}{\theta_{max}}\right)^{\delta_{\varepsilon}}\right] \quad (15)$$

После проведения экспериментов по определению σ_s и A_p сплавов ВТ6с, 1201, ВТ16 были определены соответствующие значения коэффициентов уравнения 14 и 15 (табл. 1, 2).

Аппроксимирующие зависимости 14 и 15 удовлетворительно совпадают с экспериментальными результатами, их можно использовать в математических моделях ОМД исследованных сплавов. Как показали результаты статистической обработки опытных данных, суммарная ошибка S_e не превышает 7 %.

Таблица 1 - Коэффициенты реологического уравнения 14

Сплав	ε	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
ВТ6с	0,9	4,62	$2 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$1,49 \cdot 10^{-5}$	1288,44	92,01
1201	1,7	63,41	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$	16,02	2,045
ВТ16	0,1	21,01	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2,59 \cdot 10^{-5}$	899,01	349,54

Таблица 2 - Коэффициенты реологического уравнения 15

Сплав	k	$y_{\varepsilon 1}$	$y_{\varepsilon 2}$	$\varphi_{\varepsilon 1}$	$\varphi_{\varepsilon 2}$	γ_{ε}	δ_{ε}
ВТ6с	- 3,6	73,67	87,12	0,32	0,47	35,54	$9 \cdot 10^{-3}$
1201	- 2,6	61,54	68,14	0,37	0,49	19,23	$5 \cdot 10^{-3}$
ВТ16	- 1,6	9,21	11,34	0,44	0,67	25,21	$3 \cdot 10^{-2}$

Анализ реологических уравнений позволил, впервые, установить, что пластическое течение сплава ВТ16 в температурно-скоростном диапазоне деформационных процессов отличается от течения сплавов ВТ6с и 1201. Увеличение скорости деформации с $4 \cdot 10^{-2} \text{с}^{-1}$ до $9 \cdot 10^1 \text{с}^{-1}$ приводит к уменьшению коэффициента деформационного упрочнения и сохраняет высокий уровень предельной пластичности в исследованном диапазоне показателя напряженного состояния ($k = -0,58 \div -3,6$).

Четвертая глава посвящена опытно-промышленной проверке и качеству изделий, изготовленных по расчетным технологическим режимам.

Установленные в работе закономерности (14) и (15), имеющие место в процессах ОМД являются основой создания новых технологических процессов формоизменения и совершенствования существующих.

В полном объёме прошли опытно-промышленную проверку и внедрены процессы, технологические параметры, которые рассчитаны на основе новых сведений о реологии сплавов ВТ6с, 1201 и ВТ16, установленных с применением ПВД.

В современной авиационно-космической технике имеется потребность в переходных элементах соединений деталей и узлов из разнородных металлов. Указанные изделия (переходники) наиболее эффективно и при высоком качестве можно изготавливать из биметаллических труб. Однако, совместная пластическая деформация разнородных металлов возможна если их сопротивление деформации различается не более чем в 3-3,5 раза. Основной задачей при разработке технологии явилась необходимость обеспечения таких параметров пластической деформации, которые оказались бы приемлемыми для каждого из совместно деформируемых сплавов.

Осуществлена следующая последовательность подготовительных и технологических операций:

- анализом реологических уравнений (14) и (15) установлены температурно-скоростные условия совместной пластической деформации композиции ВТ6с÷1201. По методике А.И. Колпашникова рассчитаны технологические параметры горячего гидропрессования (табл. 3).

Таблица 3. Технологические параметры горячего гидропрессования биметаллических труб ВТ6с÷1201

Температура нагрева, К		Угол конусности, α°	Коэффициент вытяжки			Размеры трубы, мм			Скорость прессования, мм/с
θ_{1201}	$\theta_{ВТ6с}$	Матрица	$\lambda_{общ}$	λ_{1201}	$\lambda_{ВТ6с}$	$D_{нар}$	$d_{ном}$	$d_{отв}$	
383	973	40	6,8	6,8	2,8	28	19	10	15 – 25
÷	÷								
413	1073								

- подготовка компонент и сборка биметаллической заготовки путем обезжиривания поверхности контакта и вакуумированием зазора между ними с помощью кольцевых токоизолирующих клиньев, которые запрессовывали на вакуумной установке, обеспечивающей глубину вакуума до 0,026 Па;

- нагрев заготовок перед деформацией на установке электроконтактного нагрева типа 2921 мощностью 500 кВт (рис. 9).

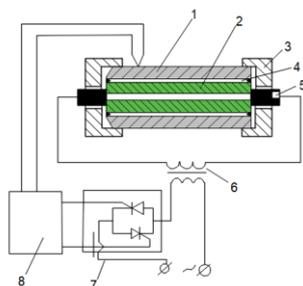


Рисунок 9 - Схема градиентного нагрева биметаллической заготовки электроконтактным способом: 1 – 1201; 2 – ВТ6с; 3 – фиксаторы; 4 – вакуумированный зазор между компонентами; 5 – система токоподвода; 6 – силовой трансформатор; 7 – блок тиристоров; 8 – блок управления.

Электрический ток воздействует только на внутреннюю компоненту диаметром 32 мм в течении 480 с, обеспечивая заданный температурный профиль заготовки (рис. 10).

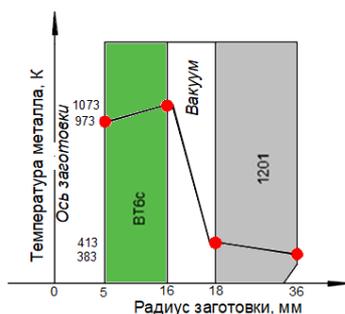


Рисунок 10 - Температурный профиль заготовки через 12 с после окончания нагрева (время транспортировки от нагревателя к прессу)

Градиентный нагрев биметаллической заготовки с вакуумированным зазором между токоизолированными компонентами позволяет обеспечить к началу процесса гидропрессования допустимое соотношение между сопротивлением деформации компонент

$$\frac{\sigma_{sVT6c}}{\sigma_{s1201}} = 2,1 \div 2,8;$$

- горячее гидропрессование на вертикальном гидравлическом прессе НР 630 усилием 6,3 МН.

Изготовлены биметаллические трубы без нарушения сплошности, длиной до одного метра с чистой и гладкой поверхностью, минимальной неравномерностью распределения слоев (рис. 11).



Рисунок 11 - Макроструктура прессостатка (а) и переходник (б)

Оценка качества соединений по результатам механических испытаний на растяжение и ударный изгиб при комнатной температуре показали высокую прочность соединения ($\sigma_s = 430 \div 440$ МПа, $\sigma_{0,2} = 320 \div 340$ МПа, $\delta = 8 \div 10$ %, $KCU = 0,0105 \div 0,018$ кДж/м²), что соответствует свойствам сплава 1201. Герметичность соединения слоев находится в интервале от $5 \cdot 10^{-13}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ Па/с · м³, а скорость протекания гелия составляет $30 \div 34$ мг/с, что соответствует техническим требованиям к переходникам.

Результаты промышленного опробования позволили рекомендовать впервые разработанную технологию для внедрения в производство, что отражено в

соответствующем «Акте», утвержденном Генеральным директором ООО «Мегаметалл» и в совместно изданной технологической рекомендации «Производство композиционных труб для переходных элементов соединений деталей и узлов из разнородных металлов».

Наиболее рациональная технология изготовления титановых крепежных деталей, предусматривает холодную деформацию. Благоприятным сочетанием механических свойств применительно к деталям крепления обладает сплав ВТ16 (Ti-3Al-4,5V-5,0Mo), поэтому он относится к числу наиболее пригодных для производства титанового крепежа.

Действующая технологическая схема производства титановых гаек размером «под ключ» S 8; 10; 13; 17; 19 состоит из 10 операций. Наиболее трудоемкими, энергоемкими и, в то же время, обеспечивающими качество готовой продукции, являются операции холодной прокатки, режим которой, в настоящее время, включает 5 проходов с 2 промежуточными отжигами для каждого типоразмера шестигранного прутка. Холодную прокатку осуществляют на стане Kocks 260.

Скорость прокатки стана позволяет варьировать скоростью деформации в очаге прокатки в широком диапазоне значений $2 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1} \div 7 \cdot 10^1 \text{с}^{-1}$. Это обстоятельство предопределило возможность совершенствования технологии прокатки на основе реализации результатов исследований σ_s (14) и A_p (15) сплава ВТ16 на ПВД.

Анализ реологических уравнений показал возможность усовершенствования базового технологического процесса холодной прокатки, путем сокращения числа проходов с 5 до 2 с сохранением количества суммарных обжатий (рис. 12). Расчет энергосиловых параметров прокатки осуществляли по методике А.И. Целикова. При этом энергосиловые параметры прокатки не превышают допустимых значений.

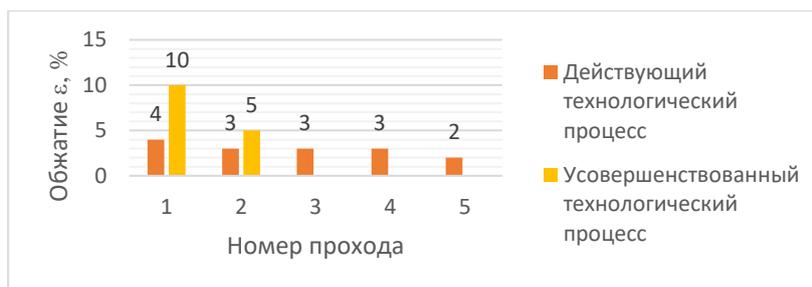
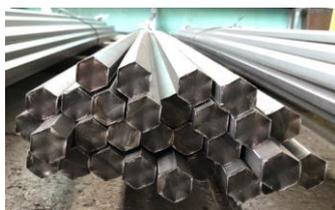


Рисунок 12 - Распределение обжатий по проходам

Холоднокатаные шестигранные прутки отличаются высоким качеством поверхности, точностью геометрических размеров, полнотой заполнения углов в вершинах шестигранника (рис. 13, а). По усовершенствованной технологии изготовлена партия гаек размером «под ключ» S 8; 10; 13; 17; 19 (рис. 13, б).



а



б

Рисунок 13 - Шестигранные прутки (а) и гайки (б) различной конструкции из сплава ВТ16

Прочность шестигранного прутка оценивали по результатам испытаний на растяжение четырех образцов отобранных от двух прутков каждой партии. Форма и размеры образцов, а также методика испытаний соответствует ГОСТ 1497-84. Результаты испытаний показали удовлетворительные механические свойства ($\sigma_b = 1030 \div 1275$ МПа, $\delta = 10 \div 18$ %, $\psi = 50 \div 57$ %).

Контроль качества крепежа проводили по измерению твердости на одной из опорных поверхностей гайки в трех точках, смещенных относительно друг друга на 120° , а значение твердости (41 HRC) определяли как среднее арифметическое трех измерений. Испытания твердости по Роквеллу являются решающими, при этом применяется нагрузка 37 кН (ГОСТ 9013-59). Качество поверхности соответствует ГОСТ 1759.3-83.

Усовершенствованный технологический процесс изготовления шестигранных прутков позволил рекомендовать разработанную технологию для внедрения в промышленное производство, что отражено в соответствующем «Акте», утвержденном Генеральным директором ООО «Мегаметалл» и в совместно изданной технологической рекомендации «Производство титановых профилей для изготовления деталей крепления агрегатов и узлов летательных аппаратов».

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработан и применен в работе пластометр высокого давления для испытаний образцов на растяжение и сжатие при температуре $293 \text{ К} \div 1073 \text{ К}$, скорости деформации $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1} \div 9 \cdot 10^1 \text{ с}^{-1}$ и показателе напряженного состояния $-0,58 \div -3,6$. Математические модели испытаний связывают скорость деформирования со скоростью деформации и позволяют рассчитывать конструкцию вспомогательного образца, обеспечивающего постоянство скорости деформации при испытаниях.

2. Путем численного моделирования и экспериментально разработан и всесторонне исследован образец для испытаний на сжатие в пластометре высокого давления. Цилиндрический образец с торцевыми выточками имеет осевое отверстие, причем отношение диаметра отверстия к высоте образца находится в пределах $\frac{1}{13} - \frac{2}{13}$, а отношение

диаметра образца к диаметру отверстия равно 7,8 – 8,1, что впервые обеспечило однородную деформацию до значений 65-75%.

3. Путем проведения экспериментальных исследований на пластометрах высокого давления установлены закономерности взаимосвязи сопротивления деформации и предельной пластичности с температурой, степенью, скоростью деформации и показателем напряженного состояния для сплавов ВТ6с, 1201 и ВТ16 во всем температурно-скоростном диапазоне их пластического формоизменения. Закономерности представлены в виде объёмных диаграмм и соответствующих им реологических уравнений: $\sigma_s = a_5 \frac{\varepsilon^{a_2} \times \xi^{a_3}}{\sqrt{3}} \exp[a_4(a_1\theta + a_6)]$ и $L_p = [y_{\varepsilon 2} - (y_{\varepsilon 1} - y_{\varepsilon 2})\xi] \exp\{[\varphi_{\varepsilon 2} - (\varphi_{\varepsilon 1} - \varphi_{\varepsilon 2})\xi]k\} \exp\left[\gamma_3 \left(\frac{\theta_{min}}{\theta_{max}}\right)^{\delta_3}\right]$. Получены коэффициенты реологических уравнений для исследованных сплавов.

4. Результаты исследования прошли опытно-промышленную проверку на предприятии. Впервые разработана технология изготовления биметаллических труб с соотношением сопротивлений деформации компонент более чем 3,5. Технология предусматривает сборку биметаллической заготовки с токоизолированным вакуумированным зазором между компонентами (от 0,013 до 0,026 Па), её градиентный нагрев в течи 480 с электроконтактным способом (ВТ6с до 973 ÷ 1073 К, 1201 до 383 ÷ 413 К) и последующее горячее гидропрессование. Изготовлены биметаллические трубы композиции ВТ6с÷1201 с чистой и гладкой поверхностью и минимальной неравномерностью распределения слоев по длине. При испытаниях прочности соединения на разрыв и ударный изгиб, разрушение всех образцов происходило по сплаву 1201. Разработанная технология рекомендована в промышленное производство.

5. На основе новой экспериментальной информации усовершенствована технология холодной прокатки шестигранных прутков размером «под ключ» S 8; 10; 13; 17; 19 из титанового сплава ВТ16 на сортовом прокатном стане Kocks 260. Количество проходов при прокатке каждого типоразмера прутка уменьшено с 5 до 2 с сохранением суммарного обжатия. Энергосиловые параметры прокатки не превышают допустимых значений. По качеству поверхности, точности геометрических размеров, полноте заполнения углов в вершинах шестигранника, прутки соответствуют техническим условиям предприятия ООО «Мегаметалл».

6. Результаты практической реализации разработанных технологических процессов отражены в утвержденных Научно-техническим советом предприятия ООО «Мегаметалл» трех технологических рекомендациях и подтверждены Актом промышленного опробования. Материалы научных исследований внедрены в учебный процесс института

при чтении трех курсов лекций («Теория пластичности», «Физика и техника высоких давлений», «Теория и технология гидропрессования»), отражены в «Методическом руководстве к практическим занятиям» и подтверждены актом внедрения, утвержденным проректором МАИ по учебной работе.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Федоров А.А., Беспалов А.В., Комаров Р.С. Пластометры высокого давления. Журнал «Технология машиностроения». №4, М, 2020. – 48-53 с.
2. Федоров А.А., Беспалов А.В., Комаров Р.С. Определение сопротивления деформации металлов с использованием образца новой конструкции. «Технология машиностроения» М.: Издательский центр «Технология машиностроения» №9, 2018. с. 48-51.
3. Федоров А.А., Беспалов А.В., Комаров Р.С. Моделирование процесса осадки цилиндрического образца с торцевыми выточками и отверстием. «Технология легких сплавов». М: Издатель ОАО «ВИЛС», №3, 2018. с. 68-71.
4. Федоров А.А., Беспалов А.В., Комаров Р.С. Применение высоких гидростатических давлений для исследования сопротивления деформации металлов. Журнал «Технология машиностроения». №8, М, 2017. – 11-15 с.

Статьи и материалы конференций:

5. Федоров А.А., Комаров Р.С. Сравнение результатов испытаний образцов материала на сжатие на кулачковом пластометре высокого давления. XLV Гагаринские чтения Международная молодежная научная конференция: М.: МАИ, 2019. 819-820 с.
6. Федоров А.А., Комаров Р.С. Применение пластометра высокого давления для определения сопротивления деформации. Техника и технологии машиностроения. VII Международная студенческая научно-практическая конференция. Омск. Издательство ОмГТУ. 2018. с. 77-81.
7. Федоров А.А., Комаров Р.С. Определения сопротивления деформации металлов на пластометре высокого давления. Гагаринские чтения: XLIV. Международная молодежная научная конференция: М.: МАИ, 2018. - 273 с.
8. Беспалов А.В., Иванов А.А., Комаров Р.С. Сравнительный анализ осадки цилиндрических образцов в программе QForm. Гагаринские чтения: XLIII. Международная молодежная научная конференция: М.: МАИ, 2017. 254-255 с.
9. Федоров А.А., Комаров Р.С. О возможности применения высоких гидростатических давлений для исследования сопротивления деформации металлов. Гагаринские чтения: XLIII. Международная молодежная научная конференция: М.:МАИ, 2017. 468-469 с.

10. Федоров А.А., Беспалов А.В., Комаров Р.С. Предпосылка применения высоких гидростатических давлений для определения сопротивления деформации металлов. Гагаринские чтения: XLII. Международная молодежная научная конференция: В 4 т. М.: МАИ, 2016 Т.3: Технологические процессы и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов. 517-518 с.

11. Федоров А.А., Беспалов А.В., Комаров Р.С. Усовершенствованное устройство для испытаний материалов на растяжение при высоких гидростатических давлениях. Сборник научных трудов. Современные технологии обработки металлов и сплавов. – М.: ИНФРА-М, 2015. 82-86 с.

12. Федоров А.А., Комаров Р.С. Устройство для испытаний материалов на сжатие при высоких гидростатических давлениях. XLI Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции: В 4т. Т.1: Материаловедение и технологии обработки материалов для аэрокосмической отрасли. - М.: ИНФРА-М, 2015. 130-131 с.

Методические указания и технологические рекомендации

13. Федоров А.А., Петров А.П., Беспалов А.В., Комаров Р.С. Руководство к практическим занятиям по физике и технике высоких давлений. Работа №1. Расчет конструкций вспомогательных образцов для пластометров высокого давления: методическое руководство – Москва: ИНФРА-М, 2020. – 22 с.

14. Федоров А.А., Петров А.П., Беспалов А.В., Комаров Р.С., Соколов А.В., Елагин Д.Е., Луговской В.А. Определение сопротивления деформации и предельной пластичности металлических материалов на пластометрах высокого давления: технологическая рекомендация – Москва: ИНФРА-М. 2020. – 18 с.

15. Федоров А.А., Петров А.П., Беспалов А.В., Комаров Р.С., Соколов А.В., Елагин Д.Е., Луговской В.А. Производство композиционных труб для переходных элементов соединений деталей и узлов из разнородных металлов: технологическая рекомендация – Москва: ИНФРА-М. 2020. – 27 с.

16. Федоров А.А., Петров А.П., Беспалов А.В., Комаров Р.С., Соколов А.В., Елагин Д.Е., Луговской В.А. Производство титановых профилей для изготовления деталей крепления агрегатов и узлов летательных аппаратов: технологическая рекомендация – Москва: ИНФРА-М. 2020. – 19 с.

Патенты РФ:

17 Устройство для испытания образца материала на сжатие в условиях гидростатического давления: а.с. 2709426 Рос. Федерация: МПК ⁵¹ G 01 N 3/08/ А.А.

Федоров, А.В. Беспалов, Р.С. Комаров; МАИ, №2019108890; заявл. 27.03.2019; опубл. 17.12.2019, Бюл. №35. – 6 с.

18. Способ испытания образцов на разрыв и сжатие при высоких гидростатических давлениях: а.с. 2703828 Рос. Федерация: МПК ⁵¹ G 01 N 3/08, СПК ⁵² G 01 N 3/08 / А.А. Федоров, А.В. Беспалов, Р.С. Комаров; МАИ, № 2019108891; заявл. 27.03.2019; опубл. 22.10.2019, Бюл. №30. – 6 с.

19. Устройство для испытания образца материала на сжатие при высоких гидростатических давлениях: а.с. 2655043 Рос. Федерация: СПК ⁵² G 01 N 3/80/ А.А. Федоров, А.П. Петров, А.В. Беспалов, Р.С. Комаров; МАИ, № 2017117507; заявл. 19.06.2017; опубл. 23.05.2018, Бюл. №15. – 4 с.

20. Цилиндрический образец для испытания на сжатие: а.с. 2627957 Рос. Федерация: МПК ⁵¹ G 01 N 1/28, G 01 N 3/08 / А.А. Федоров, А.П. Петров, А.В. Беспалов, В.А. Луговской, Р.С. Комаров; МАИ, № 2016138066; заявл. 26.09.2016; опубл. 14.08.2017, Бюл. №23. – 6 с.