

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»

---

На правах рукописи



Комаров Роман Сергеевич

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

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –

Заслуженный работник высшей школы РФ,  
профессор, д.т.н., Федоров Анатолий Александрович

Москва, 2020 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	7
Глава 1. ПРЕДПОСЫЛКИ К ИССЛЕДОВАНИЮ РЕОЛОГИИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЯХ .....	13
1.1. Проблема разработки новых и совершенствования существующих процессов обработки металлов давлением.....	13
1.2. Сопротивление деформации и пластичность металлов при высоких гидростатических давлениях .....	22
1.3. Обоснование комплекса теоретических и экспериментальных исследований, положенных в основу создания методов испытаний металлов при высоких гидростатических давлениях и разработка обобщенной схемы исследования .....	36
ВЫВОДЫ.....	38
ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ В РАБОТЕ .....	39
Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСПЫТАНИЙ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕОЛОГИИ МЕТАЛЛОВ НА ПЛАСТОМЕТРАХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ .....	42
2.1. Пластометры высокого давления для исследования сопротивления деформации и предельной пластичности металлов .....	42
2.2. Математические модели пластометров высокого давления .....	48
2.3. Моделирование процесса осадки цилиндрического образца с торцевыми выточками и отверстием .....	55
2.4. Разработка методики испытаний металлов на сжатие, растяжение и кручение при высоких гидростатических давлениях.....	61
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2 .....	68
Глава 3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНОМ ДИАПАЗОНЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ.....	70
3.1. Построение и анализ диаграмм сопротивления деформации сплавов ВТ6с, 1201 и ВТ16 в практически важном диапазоне термомеханических параметров пластической деформации.....	70
3.2. Результаты экспериментального исследования предельной пластичности сплавов ВТ6с, 1201 и ВТ16 .....	74

3.3. Аппроксимация экспериментальных данных реологическими уравнениями и создание алгоритма испытаний и количественной оценки их результатов .....	78
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 .....	82
Глава 4. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПРОВЕРКА, КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО РАСЧЕТНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ РЕЖИМАМ .....	83
4.1. Опытно-промышленная проверка и результаты внедрения работы .....	83
4.2. Разработка технологии изготовления биметаллических труб ВТ6с÷1201 для переходных элементов соединений деталей и узлов из разнородных металлов .....	85
4.3. Совершенствование технологии холодной прокатки шестигранных прутков из титанового сплава ВТ16 для изготовления деталей крепления конструкций летательных аппаратов .....	95
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 .....	105
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ .....	107
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	110
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	116
Приложение 1. Акты внедрения результатов работы .....	117
Приложение 2. Технологические рекомендации и методические указания для студентов.....	120
Приложение 3. Патенты .....	124

## ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

ОМД	Обработка металлов давлением;
ВГД	Высокие гидростатические давления;
ПВД	Пластометр высокого давления;
НДС	Напряженно-деформированное состояние;
$KCU$	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup> ;
$\sigma_s$	Сопротивление деформации, МПа;
$\theta$	Температура деформации, К;
$\varepsilon$	Степень деформации, %;
$\xi$	Скорость деформации, с <sup>-1</sup> ;
$A_p$	Предельная пластичность;
$k\left(\frac{\sigma}{T}\right)$	Показатель напряженного состояния;
$\sigma$	Среднее напряжение, МПа;
$T$	Интенсивность касательных напряжений, МПа;
$\eta$	Вязкость среды, П;
П	Количество стеклопорошка, % по объему;
$p$	Гидростатическое давление рабочей среды, МПа;
$D_0$	Переменный диаметр вспомогательного образца, м;
$d_M$	Диаметр канала матрицы, м;
$h_0$	Высота заготовки до испытания, м;
$v_d$	Скорость деформирования, м/с;
$z$	Текущая координата образца вдоль его оси, м;
$L$	Высота вспомогательного образца, м;
$\xi$	Интенсивность скоростей деформации, с <sup>-1</sup> ;
$\xi_{cp}$	Средняя скорость деформации, с <sup>-1</sup> ;
$d_{отв}$	Диаметр отверстия, мм;
$H_{обр}$	Высота образца, м;

$\mu$	Коэффициент однородности деформации образца;
$d_0$	Начальный диаметр образца, мм;
$d_k$	Конечный диаметр образца, мм;
$\lambda$	Коэффициент вытяжки;
$\Delta$	Величина зазора, мм;
$D_{\text{нар}}$	Наружной диаметр, мм;
$d_{\text{ном}}$	Номинальный диаметр, мм;
$D_{\text{ном}}$	Номинальный диаметр внутренней трубной заготовки, м;
$\alpha_1, \alpha_2$	Температурные коэффициенты линейного расширения внутренней и внешней трубной заготовки, $\text{K}^{-1}$ ;
$\theta_1, \theta_2$	Температура нагрева внутренней и внешней трубной заготовки, К;
$\sigma_{0,2}$	Предел текучести, $\text{кг/мм}^2$ ;
$\delta$	Относительное удлинение при разрыве, %;
$v$	Скорость прокатки, м/с;
$P$	Измеренная сила, МН;
$F$	Расчетная площадь поперечного сечения образца, $\text{м}^2$ ;
$h_{\text{п}}$	Перемещение пуансона, м/с;
$d_r, h_r$	Диаметр и высота образца в момент разрушения, м;
$\varphi$	Угол наклона метки в момент разрушения, который до испытания совпадает с образующей образца, °;
$D_{\text{пр}}$	Диаметр прутка, мм;
$S$	Площадь поперечного сечения, $\text{мм}^2$ ;
$\Delta h$	Величина обжатия, мм;
$p_{\text{ср}}$	Среднее контактное давление, МПа;
$M_{\text{пр}}$	Момент прокатки, МН·м;
$\omega$	Частота вращения двигателя, об/мин;
$\sigma_{\text{max}}$	Максимальное значение сопротивления деформации, МПа;

$d$	Диаметр наименьшего поперечного сечения образца в шейке, м;
$R$	Радиус кривизны на контуре шейки, м;
$\psi$	Относительное сужение, %;
$F_0$	Начальная площадь поперечного сечения образца, м <sup>2</sup> ;
$m$	Количество зерен, приходящихся на 1 мм <sup>2</sup> площади шлифа (2n);
$n$	Количество зерен на площади 0,5 мм <sup>2</sup> при увеличении 100 <sup>x</sup> .

## ВВЕДЕНИЕ

Эффективность любого технологического процесса определяется с одной стороны, возможностью достижения при его применении таких результатов, которые нельзя достичь другими методами, а с другой – его экономичностью. Очевидно, что оптимальным будет вариант, когда новая технология позволяет сочетать обе эти стороны, являющиеся надежным стимулом для ее разработки и внедрения.

Высокий технико-экономический эффект в технологии ОМД достигается только там, где удастся выявить и использовать все специфические особенности процесса, связанные с возможностью наиболее гибкого управления НДС деформируемого металла на основе знания его реологии.

Реологические уравнения входят в систему уравнений описывающих математические модели процессов пластического формоизменения металлов. От качества этих уравнений зависит степень универсальности математических моделей, которые должны обеспечивать адекватность, точность и экономичность расчетов. Известно, что наиболее достоверные сведения по определению сопротивления деформации и предельной пластичности получают в результате исследований, проводимых с использованием кулачковых и торсионных пластометров по различным законам развития деформации во времени.

Однако, указанные испытания проводят при показателе напряженного состояния не ниже  $-0,58$ , а диаграммы сопротивления деформации и предельной пластичности строят экстраполяцией экспериментальных данных. Реальные же процессы ОМД осуществляют при значительных отрицательных показателях напряженного состояния (менее  $-0,58$ ), обеспечить которые при испытаниях на кулачковых и торсионных пластометрах невозможно.

Таким образом, определение значений напряжений и пластичности, соответствующих области отрицательных значений показателя напряженного состояния ( $-0,58 \div -3,6$ ) является актуальной задачей исследования, позволит

усовершенствовать реологические уравнения, разработать новые и пересмотреть существующие процессы пластического формоизменения.

***Целью работы является*** установление закономерностей взаимосвязи сопротивления деформации и предельной пластичности металлов со степенью, скоростью, температурой деформации и показателями напряженного состояния, имеющими место в процессах обработки металлов давлением, разработка и внедрение на основе результатов экспериментального исследования нового технологического процесса изготовления биметаллических труб ВТ6с ÷ 1201 для переходных элементов соединений деталей и узлов из разнородных металлов и совершенствование технологии 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 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 74 – 76 %) при испытаниях на сжатие в контейнере высокого давления. В ходе экспериментальных исследований однородность



деформации подтверждена контролем постоянства отношения диаметра образца к диаметру центрального отверстия ( $\frac{D}{d} = 7,8 \div 8,1$ );

- 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, вида образца на сжатие и реологических уравнений для сплавов ВТ6с, 1201, ВТ16.

***Практическая значимость*** диссертации доказана связью изысканий с потребностью отрасли, а полученные научные результаты подтверждены материалами, зафиксировавшими ценность разработок и возможность их практического применения для промышленности и в учебном процессе:

- 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» (приложение 1).

- разработаны технологические рекомендации по изготовлению биметаллических труб ВТ6с÷1201 и холодной прокатке шестигранных прутков из титанового сплава ВТ16 позволяющие обеспечить протекание технологического процесса в условиях однородности деформационных процессов. Технологические рекомендации утверждены на НТС ООО «Мегаметалл» (приложение 2).

- получено четыре патента РФ на пласометр высокого давления, методики проведения испытаний и конструкцию образцов для сжатия в пласометре (приложение 3).

- 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» (приложение 2) и подтверждены актом внедрения, утвержденным проректором МАИ по учебной работе (приложение 1).

***Степень достоверности научных положений и выводов*** определяется: во-первых, адекватностью математических моделей процессам испытаний металлов на сжатие, растяжение и кручение на пласометрах высокого давления; во-вторых использованием современного испытательного оборудования, контрольно-измерительной аппаратуры и привлечения ряда физико-химических методов исследования (световая микроскопия); результатами опытно-промышленной проверки и внедрением новых методов испытаний металлов и новых технологических процессов изготовления биметаллических труб и холодной прокатки титановых прутков.

***Законченность работы*** определена совокупностью результатов экспериментального и теоретического исследования и практической реализацией разработок.

В данной работе на основании исследований, выполненных автором, решена часть крупной научно-технической проблемы – созданы теоретические основы, разработаны конструкции пласометров высокого давления и образцы, обеспечивающие испытания металлов на сжатие, растяжение и кручение в условиях однородной деформации при показателях напряженного состояния имеющих место в процессах ОМД, что позволяет интенсифицировать формоизменение, повысить технико-экономические

показатели производства и достичь новых результатов в производстве уникальных изделий, в том числе, композиционных материалов.

*Полученные научные результаты* явились базой для разработки и опытно-промышленной проверки технологических процессов изготовления биметаллических труб ВТ6с ÷ 1201 для переходных элементов соединений деталей и узлов из разнородных металлов и холодной прокатки шестигранных прутков из титанового сплава ВТ16 для изготовления деталей крепления конструкций летательных аппаратов. Результаты практической реализации разработанных технологических процессов подтверждены технико-экономическими актами внедрения от предприятия, утвержденными технологическими рекомендациями, другими документами.

*Достигнутый в результате внедрения эффект* состоит в интенсификации процессов холодной прокатки прутков из титанового сплава ВТ16, создании, впервые, биметаллических труб ВТ6с ÷ 1201 из сплавов со значительным различием сопротивления деформации и повышением технико-экономических показателей производства.

Работа выполнена во исполнении «Договора на выполнение НИР» на тему: «Установление закономерностей взаимосвязи сопротивления деформации металлов с температурой, степенью и скоростью деформации и разработка на основе исследований новых технологических процессов пластической деформации», утверждённого руководителем ООО «Мегаметалл» и проректором МАИ.

#### ***Апробация работы.***

В полном объеме диссертационная работа рассмотрена на НТС ООО «Мегаметалл» и на заседании кафедры ТиСАПРМП МАИ. 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.

Результаты исследований, представленные в диссертации, опубликованы в 4 статьях в отраслевых журналах рекомендованных ВАК, 3 технологических рекомендациях подготовленных совместно с предприятием и методических указаниях к практическим занятиям по курсу «Физика и техника высоких давлений» для студентов МАИ.

Новизна разработанных способов и устройств для испытаний металлов при высоких гидростатических давлениях, образца для сжатия в пластометре высокого давления подтверждена 4 патентами на изобретения.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе МАИ для подготовки бакалавров и магистров на кафедре ТиСАПРМП.

# **Глава 1. ПРЕДПОСЫЛКИ К ИССЛЕДОВАНИЮ РЕОЛОГИИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЯХ**

Создание новых и совершенствование существующих технологических процессов ОМД основано на математическом моделировании и вычислительном эксперименте, позволяющих получить наиболее полную 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 и предельной пластичности со степенью, скоростью, температурой деформации и показателем напряженного состояния.

## **1.1. Проблема разработки новых и совершенствования существующих процессов обработки металлов давлением**

При формулировке реологических уравнений состояния исследователь нередко сталкивается с дилеммой: точность или простота. Для задач ОМД важны оба фактора. Точная формулировка реологических уравнений — это важная область научного поиска, разработка которой дает определяющий вклад в решение задач о пластическом течении.

Предварительный анализ литературных сведений о зависимостях:

$$\sigma_s = \sigma_s(\theta, \varepsilon, \xi) \quad (1.1)$$

$$A_p = A_p(\theta, \xi, k) \quad (1.2)$$

показывает, что до настоящего времени не существует методов определения сопротивления деформации и предельной пластичности металлов, обеспечивающих широкий диапазон высоких однородных деформаций при испытаниях, которые составляют, как правило, не более 12%. В реальных процессах ОМД деформации достигают 60% и более. В этой связи

значимые перспективы открывают методы испытаний, разрабатываемые в МАИ. Испытания предусматривают использование ВГД для повышения пластичности испытуемых материалов и получения, таким образом, реальных, а не приближенных с помощью различных приемов аппроксимации данных по сопротивлению деформации и предельной пластичности.

Сопротивление деформации является важнейшей реологической характеристикой металлов, определяющей энергосиловые параметры процессов ОМД и характер течения металла, в частности распределение деформации по объему заготовки при её нагружении.

Информация о  $\sigma_s$  в зависимости от степени, скорости и температуры деформации необходима для практических расчетов конкретных технологических процессов ОМД и для компьютерного моделирования этих процессов, поэтому накопление базы данных по  $\sigma_s$  различных металлов в широком диапазоне изменения условий обработки актуально для исследователей.

В процессе холодной пластической деформации металлов, как правило, происходит их деформационное упрочнение, т.е. повышение сопротивления деформации, в результате чего продолжение деформации возможно лишь при увеличении приложенного напряжения.

Состояние упрочненного (наклепанного) металла термодинамически неустойчиво, и при нагреве в металле происходят процессы разупрочнения, основными из них являются возврат и полигонизация, а при высоких температурах – рекристаллизация (первичная, собирательная и вторичная), при которых частично или полностью восстанавливаются структура и свойства деформированного металла. Для некоторых металлов при определенных температурно-скоростных условиях деформации может происходить разупрочнение уже в процессе деформирования (динамическое разупрочнение) [1,2].

Характер кривых течения или зависимости сопротивления деформации от степени деформации может различаться для разных по составу металлов и

в значительной мере зависит от температуры и скорости их нагружения. Кривые течения можно разделить на четыре основных типа (рис.1.1) [3].

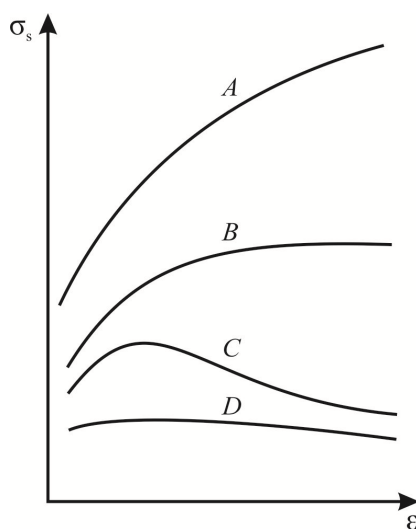


Рисунок 1.1 - Возможные варианты кривых сопротивления деформации металлов при различных температурно-скоростных условиях деформации

На начальном этапе нагружения имеет место более-менее интенсивное деформационное упрочнение. Для кривых типа *A* (см. рис.1.1) характерно наличие упрочнения на всем протяжении нагружения. При этом коэффициент упрочнения несколько снижается за счет процессов динамического возврата, полигонизации и теплового эффекта пластической деформации. Подобный вид кривых характерен для динамического нагружения в условиях холодной, теплой, а иногда и горячей деформации, если металл разрушается раньше, чем на кривых  $\sigma_s - \varepsilon$ , достигается область устойчивого течения.

Для кривых типа *B* сопротивление деформации по ходу нагружения постепенно стабилизируется (достигается установившаяся стадия течения), в металле более интенсивно проходят процессы динамического разупрочнения.

Наиболее характерным видом кривых сопротивления деформации металлов в условиях теплой и горячей деформации является кривая типа *C* с ярко выраженным максимумом значений  $\sigma_s$ . У кривых типа *C* с ростом  $\varepsilon$  в

дополнение к динамическому возврату и полигонизации начинается и происходит динамическая рекристаллизация, что обуславливает снижение уровня  $\sigma_s$ . В каждом конкретном случае ход кривой определяется также скоростью деформации и ходом процесса полигонизации или (и) рекристаллизации.

При определенных условиях деформирования ряд металлов ведет себя как жесткопластические тела без заметного упрочнения (кривая типа *D*), например, среднеуглеродистые низколегированные стали при высоких температурах порядка 1473 – 1523 К и низких скоростях деформации.

Сопротивление деформации принято определять при одноосном напряженном состоянии металла. Кроме того, в процессе испытания обеспечивают, как правило, постоянство температуры и скорости деформации образцов. Все это позволяет сравнивать результаты испытаний, полученные в разных работах на различном оборудовании, и согласно *гипотезе Людвига о единой кривой течения* использовать эти результаты для расчетов более сложных по напряженно-деформированному состоянию процессов ОМД [3,4].

В практике исследований, как правило, используются следующие методы определения сопротивления деформации: одноосное растяжение и сжатие (осадка), кручение и изгиб образцов [3].

Следует отметить также методы восстановления кривой сопротивления деформации по результатам индентирования. Так, в работе [4] описан алгоритм отыскания параметров кривой упрочнения методом одиночного внедрения острого индентора (пирамид Берковича, Виккерса или конического индентора). В работе [5] метод был развит для определения диаграммы деформационного упрочнения по результатам вдавливания нескольких инденторов с разными углами при вершине. В работе [6] для построения диаграмм деформационного упрочнения использовали различные типы инденторов – конусы с разными углами конусности, а в работе [7] предложен метод восстановления кривой деформирования по результатам вдавливания и царапания индентором Берковича.



Наиболее удобным методом определения сопротивления деформации, как правило, является метод сжатия (осадки) образцов. Достоинством этого метода является близость схемы деформации с основными процессами ОМД (ковкой, штамповкой, прокаткой, прессованием) как по напряженному, так и деформированному состоянию металла. Экспериментальное определение  $\sigma_s$  методом сжатия (осадки) осуществляется, как правило, на специальном оборудовании – пластометрах. Различные конструкции кулачковых и торсионных пластометров описаны в работе [3].

Экспериментальное определение диаграмм пластичности материалов является сложной задачей. Трудно подобрать такой вид испытаний, чтобы обеспечить неизменность показателя напряженного состояния и определить в месте разрушения предшествующую ему степень деформации [2,3].

Испытания на пластичность в горячем состоянии проводят при фиксированных значениях температуры и скорости деформации. В процессах пластического деформирования показатель напряженного состояния изменяется во всем температурно-скоростном диапазоне пластического формоизменения. Поэтому изучать пластичность металла можно лишь комбинируя различные виды испытаний [2,3].

Для выявления многофакторной зависимости пластичности металлов выбирают такие планы эксперимента [8] и виды горячих испытаний, которые позволяют на основе формализованных правил свести ошибку эксперимента к минимуму и оценить влияние управляющих факторов.

Значительный вклад в накопление и систематизацию результатов многочисленных экспериментальных исследований прочностных и пластических свойств промышленных металлов в условиях различных процессов ОМД внесли Л.Д. Соколов, Г.Я. Гун, П.И. Полухин, А.М. Галкин, В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов, А.И. Колпашников и другие исследователи.

Основной объем имеющегося экспериментального материала составляют данные по стандартным прочностным характеристикам твердости

- HB, HRC, HV, полученные традиционными методами испытаний на различном оборудовании. Однако в последнее время отмечается тенденция к накоплению экспериментального материала по влиянию температурно-скоростных условий деформирования на изменение сопротивления деформации, прочностных характеристик и пластичности в условиях, соответствующих реальным процессам ОМД.

Как правило, данному направлению отвечают методы испытаний на кулачковых пластометрах в широком диапазоне изменения температуры и скорости деформации, рассмотренные в работах [8, 9]. Например, в работе [3] дано описание методов и методик кратковременных механических испытаний, а также приемов математической обработки опытных данных при определении механических свойств металлов. В работе [8] методика экспериментального изучения пластичности и результаты испытаний рассмотрены как составная часть общей задачи оценки ресурса пластичности и прогнозирования разрушения металлов в различных технологических процессах.

При изучении пластичности металлов подбирают такие виды испытания, чтобы в месте разрушения можно было определить достигнутую степень деформации, а в процессе испытания устанавливать и поддерживать постоянными значения показателя напряженного состояния и скорости деформации. В работе [9] показано, что посредством комбинирования испытаний методами растяжения, изгиба, кручения и осадки образцов можно получить связь пластичности и показателя напряженного состояния.

Для установления зависимости пластичности от показателя напряженного состояния широкое распространение получил метод испытаний металлов на растяжение. Хотя данный метод является достаточно простым, применение стандартных характеристик удлинения и относительного сужения, используемых при механических испытаниях, в данном случае неприемлемо в силу их условности. В работах [8,9] выделены показатели

пластичности, напряженного состояния и разработаны способы их определения.

Например, в соответствии с разработанной методикой в работе [8] для построения диаграммы  $\Lambda_p(k)$  (рис. 1.2) проведены следующие испытания: растяжение цилиндрических образцов с выточкой, имитирующей шейку; изгиб плоских образцов; изгиб образцов квадратного сечения; сжатие цилиндрических образцов полированными бойками со смазкой (сернистый молибден); аналогичное сжатие со смазкой под всесторонним гидростатическим давлением; выдавливание образцов жидкостью высокого давления. Все измерения размеров выполнены с помощью инструментального микроскопа (Saike Digital SK2500TH2).

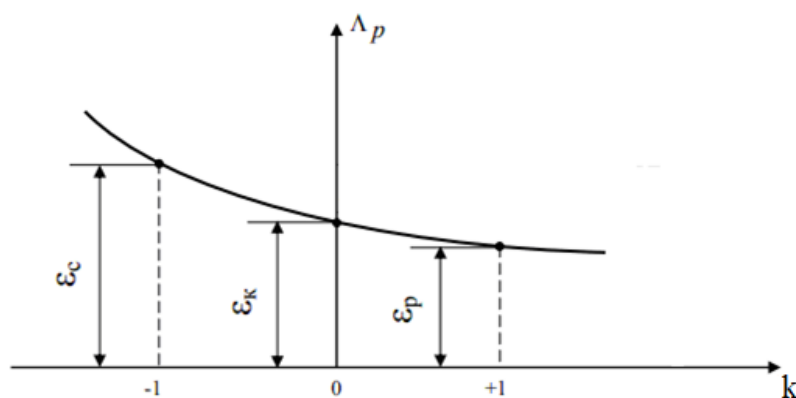


Рисунок 1.2 - Изотермический разрез диаграммы пластичности металла:

$\epsilon_p$ ,  $\epsilon_k$ ,  $\epsilon_c$  – предельные деформации при растяжении (+1), кручении (0), сжатии (-1) [7]

Процессы ОМД характеризуются значительными пластическими деформациями, сопровождающимися не только процессами упрочнения – разупрочнения, но и процессами развития и залечивания микро – и макродефектов в деформируемом материале. Поэтому в физическом смысле понятие пластичность можно определить скорее не как свойство, а как

состояние металла, в котором происходят значительные относительные перемещения без нарушения его целостности [2,7].

Качественная сторона пластичности – это способность тела менять форму и размеры под действием внешних сил без разрушения металла. Количественные характеристики (показатели пластичности) зависят от свойств самого материала, условий деформирования, схемы напряженного состояния, размеров образцов и т.д.

В общем смысле понятие «пластичность» соответствует способности материала пластически деформироваться при тех или иных значениях термомеханических параметров без разрушения в виде макроскопического нарушения сплошности; мерой пластичности является степень деформации, накопленная материалом к моменту разрушения [2,7].

Термин «пластичность» принято относить к самому металлу, в то время как термин «деформируемость» - к конкретному телу (слитку, заготовке и т.д.) при его деформации в конкретных условиях.

Исследования пластичности и деформируемости невозможно проводить без анализа процесса разрушения металла при его пластическом формоизменении. Разрушение металла является исключительно сложным процессом и включает положения физики твердого тела, механики сплошных сред и материаловедения. Поэтому при математическом описании процессов ОМД обычно применяют различные феноменологические модели разрушения.

В литературе накоплен обширный экспериментальный материал по оценке пластичности металлов в теплом состоянии (подогретом ниже температуры рекристаллизации) на основе механических испытаний. Оценка пластичности необходима при выборе рациональных режимов процессов ОМД. Хотя сопротивление деформации с повышением температуры, как правило, уменьшается, имеются опытные данные, свидетельствующие об уменьшении пластичности при повышении температуры на интервале тепловой обработки. Достоверность оценок пластичности, полученных опытным путем,

обеспечивается при совпадении условий опытов с реальными условиями деформирования материалов при их обработке [2,8].

Другой актуальной задачей, приводящей к изучению пластичности, является разработка методик оценки долговечности конструкций, работающих при совместном действии механических и тепловых нагрузок, например котлов, газораспределительной арматуры, сосудов, работающих под давлением, оборудования.

Многочисленные экспериментальные данные, приведенные в литературе по пластичности при ОМД и по оценке долговечности конструкций, получены при испытаниях по схеме линейного напряженного состояния и без учета температурного фактора. Наиболее широкий диапазон условий деформирования охватывает методика испытаний пластичности при разных схемах напряженного состояния.

Таким образом, видно, что существует крупная научно-техническая проблема разработки новых и совершенствования существующих процессов ОМД. Она может быть решена только на основе разработки новых условий деформации, охватывающих ранее не использовавшееся температурно-скоростные параметры формоизменения, способы и устройства ОМД. Для выработки таких условий необходимо, прежде всего, установление закономерностей пластического течения металлов при ВГД и совершенствование на их основе процессов ОМД.

В современной авиационно-космической технике имеется потребность в переходных элементах соединений деталей и узлов из разнородных металлов, которые можно производить с помощью следующих способов: центробежное литье, диффузионная сварка, сварка взрывом, сварка давлением и сварка трением [9].

Из литературных источников следует, что при разработке биметаллических изделий имеет место неравномерность распределения послойных деформаций компонент из-за различия прочностных свойств металлов. Установлено, что по результатам анализа научных работ

отечественных ученых установили, что совместная пластическая деформация разнородных металлов возможна только при условии различия их сопротивления деформации не более чем в 3-3,5 раза [10]. Такая ситуация вызывает значительные трудности при формоизменении, преодолеть которые можно только имея точные сведения о реологии деформируемых металлов.

Надежность соединений конструкций летательных аппаратов зависит от качества деталей крепления. Действующая технологическая схема производства гаек состоит из множества операций. Наиболее трудоемкими являются операции холодной прокатки, которые характеризуются множеством проходов с промежуточными отжигами, отличаются значительной трудоемкостью и энергоемкостью.

Известно, что скорость прокатки стана позволяет варьировать скоростью деформации. Это обстоятельство открывает возможность совершенствования технологии прокатки на основе сведений о сопротивлении деформации (1.1) и пластичности (1.2).

## **1.2. Сопротивление деформации и пластичность металлов при высоких гидростатических давлениях**

Характеристикой прочности материала при пластической деформации является сопротивление деформации, которое зависит от ряда факторов. С помощью контроля сопротивления деформации изучают влияние условий (в том числе и термомеханических параметров) – температуры, степени и скорости деформации, которые необходимы для определения силовых параметров механического оборудования и установления наиболее производительного режима работы этого оборудования [12,13].

### *Влияние степени деформации на сопротивление деформации*

Степень деформации оказывает сложное влияние на сопротивление деформации металла. Причем это влияние зависит как от его значений, так и от состояния деформированного металла: горячее или холодное и от его природы.

С увеличением степени деформации, с одной стороны, увеличивается наклеп металла, а, следовательно, повышается и его сопротивление деформации. Но, с другой стороны, увеличение степени деформации, интенсифицируя процесс рекристаллизации, ведет к разупрочнению металла и снижению его сопротивления деформации.

Поэтому, на современном этапе развития науки, наиболее достоверную информацию может дать только феноменологический подход к исследованиям [12,18].

#### *Влияние скорости деформации на сопротивление деформации*

Скорость деформации оказывает значительное влияние на  $\sigma_s$ . С увеличением скорости деформации уменьшается время протекания процесса рекристаллизации и, следовательно, увеличивается упрочнение. Однако с повышением скорости деформации увеличивается количество выделяющейся в металле в момент деформации теплоты, которая не успевает рассеяться в окружающую среду и вызывает дополнительный разогрев металла. Увеличение же температуры сопровождается снижением сопротивления деформации металла.

В силовых расчетах при прокатке и других видах ОМД важно знать изменение сопротивления деформации в зависимости от скорости деформации при различных температурах и степенях деформации.

Увеличение сопротивления деформации с ростом  $\xi$  хорошо согласуется с дислокационной теорией упрочнения. К общим факторам, повышающим  $\sigma_s$  с увеличением скорости, относятся:

- повышение плотности дислокации и точечных дефектов;
- увеличение сил внутреннего трения;
- уменьшение влияния тепловых флуктуаций;
- изменение механизма деформации.

Зависимость сопротивления деформации от скорости деформации при различных условиях обычно представляют в виде линейной, степенной или логарифмической зависимостей (1.3) [12]:

$$\sigma_S = a\dot{\varepsilon}; \quad \sigma_S = a\varepsilon^n; \quad \frac{\sigma_S}{\sigma_0} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_l}\right)^n;$$

или (1.3)

$$\sigma_S = \sigma_0 \lg\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_l}\right); \quad \sigma_S = \sigma_0 + B \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_l}\right).$$

где  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации, с<sup>-1</sup>;  $\sigma_0$  – начальный предел текучести, кг/мм<sup>2</sup>;  $\dot{\varepsilon}_l$  – интенсивность скорости деформации;  $n$  – коэффициент, зависящий от материала, причем всегда  $n < 1$ ;  $a$  – показатель степени, различный для разных сплавов, характеризующий степень упрочнения материала при наклепе.

В условиях работы современных производственных механизмов для деформации металлов скорости деформации могут изменяться в широких пределах (в несколько тысяч раз) при значительном изменении рабочих температур. В этих условиях изменения скорости и температуры становятся важными и связанными друг с другом факторами воздействия на свойства металлов. Поэтому правильно рассматривать температурно-скоростные условия пластической деформации в совокупности.

#### *Влияние температурно-скоростных параметров на сопротивление деформации*

Температурно-скоростные параметры оказывают на величину сопротивления деформации взаимосвязанное влияние, и поэтому их следует рассматривать совместно. Это лучше всего осуществлять, применяя параметр Зенера-Холломона (1.4) [12]:

$$\sigma_{S\varepsilon=const} = f(Z) = f\left[\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)\right] \quad (1.4)$$

где:  $Z$  – параметр Зенера-Холломона;

$T$  – температура деформации, °С;

$R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К;



$Q$  – кажущаяся энергия активации, КДж/моль.

Температура и скорость деформации меняют не только уровень кривых течения, но и их характер, поскольку меняется взаимодействие процессов упрочнения-разупрочнения, проходящих в металле при данных условиях деформации.

Текущее значение  $\sigma_S$ , определяемое совместным влиянием процессов деформационного упрочнения и динамического разупрочнения может быть представлено в общем виде как (1.5):

$$\sigma_S = T, \bar{\epsilon}, \dot{\epsilon}, t, p, X \quad (1.5)$$

где  $\bar{\epsilon}$  – степень деформации, %;  $X$  – структурно-чувствительный параметр;  $t$  – время (обычно заменяют на  $\dot{\epsilon}(t)$  – закон развития деформации во времени), с.

Многие исследователи [12-17] посвятили свои работы выявлению влияния термомеханических параметров на сопротивление деформации. Эту зависимость исследовали как экспериментально, так и аналитически. Однако сложность процесса деформации металла и многофакторная зависимость сопротивления деформации и др., привели к различным мнениям по этому вопросу.

В работах ряда исследователей [12, 13, 17-19], были выявлены основные факторы, влияющие на сопротивление деформации: температура, скорость и степень деформации. При этом было установлено, что наиболее важным фактором, определяющим  $\sigma_S$ , является температура [12].

#### *Влияние температуры на сопротивление деформации*

Температура деформации оказывает на сопротивление деформации наибольшее влияние, с повышением температуры деформации не только снижается уровень кривых течения, но и изменяется их характер.

В общем, чем выше температура, тем меньше сопротивление деформации. В ряде последних экспериментальных исследований показано,

что в зависимости от температуры деформации может происходить, как динамическая полигонизация, так и динамическая рекристаллизация.

Влияние температуры на сопротивление деформации в большей степени проявляется у сплавов, чем у чистых металлов. При высоких температурах степень деформации сплавов дает заметный эффект упрочнения из-за сдерживания развития процесса динамической рекристаллизации. Кроме того, примеси в сплавах тоже играют большую роль для того, чтобы повышать эффект упрочнения.

Для выражения влияния температуры на сопротивление деформации используют зависимость по закону Н.С. Курнакова (1.6) [15]:

$$\sigma_S = \sigma'_S \cdot e^{-bt} \quad (1.6)$$

где  $e$  – температурный коэффициент;

$\sigma'_S$  – сопротивление деформации, экстраполированное до 0 К.

Приведенную зависимость иногда представляют в виде (1.7):

$$\sigma_S = \sigma_{пл} \cdot e^{b(T_{пл}-T)} \quad (1.7)$$

где  $\sigma_{пл}$  – сопротивление деформации, экстраполированное до температуры плавления данного материала.

Экспериментальные кривые температурной зависимости сопротивления деформации  $\sigma_S - \theta$  хорошо аппроксимируются экспоненциальной зависимостью указанных типов с различными значениями температурного коэффициента при фиксированных значениях скорости деформации и температуры испытания. Для многих металлов на кривых  $\sigma_S - \theta$  наблюдаются точки перегиба, связанные с фазовыми превращениями, поэтому на разных участках кривые  $\sigma_S - \theta$  имеют различные значения температурного коэффициента [15,18].

### *Пластичность и сопротивление деформации*

Надежность и прогрессивность любого технологического процесса ОМД определяется в первую очередь тем, насколько правильно учтены при его разработке основные факторы, определяющие этот процесс -  $A_p$  и  $\sigma_S$  [20].

Наиболее систематические и полные исследования пластичности и деформации металлов проведены С.И. Губкиным [21]. За меру пластичности принята относительная деформация при нулевом гидростатическом давлении. Этому соответствуют испытания на кручение, либо совместные испытания на растяжение и осадку.

Под пластичностью или предельной деформацией  $\bar{\varepsilon}_i$  понимается способность металла к пластическому формоизменению без разрушения. Характеристикой пластичности может служить накопленная интенсивность деформации до появления первой микротрещины (1.8) [22]:

$$\bar{\varepsilon}_i = \int_0^t \dot{\varepsilon}_i dt \quad (1.8)$$

где  $t$  – время протекания процесса вплоть до разрушения, с.

Одним из основных факторов, определяющих пластичность, является относительная величина среднего напряжения, определяющая жесткость схемы напряженного состояния. Влияние среднего напряжения на пластичность можно оценить с помощью параметра (1.9) [23]:

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i} \quad (1.9)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений.

Зависимость пластичности от параметра  $\Pi$  называют диаграммой пластичности [24].

В работе [25] основные характеристики напряженно-деформированного состояния металла на боковой поверхности образца (степень деформации сдвига и показатель напряженного состояния) определены в зависимости от

отношения его исходной высоты к диаметру  $\frac{h_0}{d_0}$ , величины обжатия и радиуса кривизны  $R$  боковой поверхности осаживаемых образцов.

В научных исследованиях авторами [22] предложена методика расчетной оценки деформации металлов при обработке давлением. Предложенный авторами критерий деформации позволяет рассчитывать предельно допустимые параметры технологических процессов.

Экспериментальные исследования [26] показали, что пластичность существенно зависит от температуры нагрева и от показателя жесткости схемы напряженного состояния:

- а) пластичность уменьшается с повышением температуры при  $\Pi > -0,6$ ;
- б) пластичность возрастает с повышением температуры при  $\Pi < -0,6$ .

Авторами статьи [27] предлагается по результатам испытаний на кручение оценивать пластичность и сопротивление деформации относительными показателями: относительным сдвигом; истинным пределом текучести и истинным пределом прочности при кручении. Оценка по этим показателям позволяет учесть изменения размеров образца, получить относительные характеристики и быть сравнимой с оценками, получаемыми, другими методами механических испытаний.

*Влияние ВГД на сопротивление деформации и предельную пластичность*

Первые попытки использования гидростатического давления в технологических целях были сделаны задолго до того, как, стало известно о его значительном влиянии на механические свойства металлов и сплавов. В настоящее время при гидростатических давлениях  $1500 \div 2000$  МПа осуществляют процессы выдавливания, штамповки малопластичных и труднодеформируемых материалов. Ведутся изыскания для освоения  $3000 \div 4000$  МПа. Основной причиной такого повышения давления является важный вывод физики высоких давлений о том, что пластичность – не только свойство, но и состояние материала, и при сочетании определенных физических условий

(давления, температуры, скорости деформации и др.) практически любой хрупкий материал можно перевести в пластическое состояние [28].

Обычно в качестве показателя пластических свойств материала используют предельную пластичность – истинную деформацию в момент разрушения:

$$\lambda_p = \ln \frac{F_0}{F} \text{ или } \lambda_p = \sqrt{3} \cdot \varepsilon_p \quad (1.10)$$

В результате исследования установлено, что пластичность  $\lambda_p$  увеличивается с повышением гидростатического давления (рис. 1.3) [29].

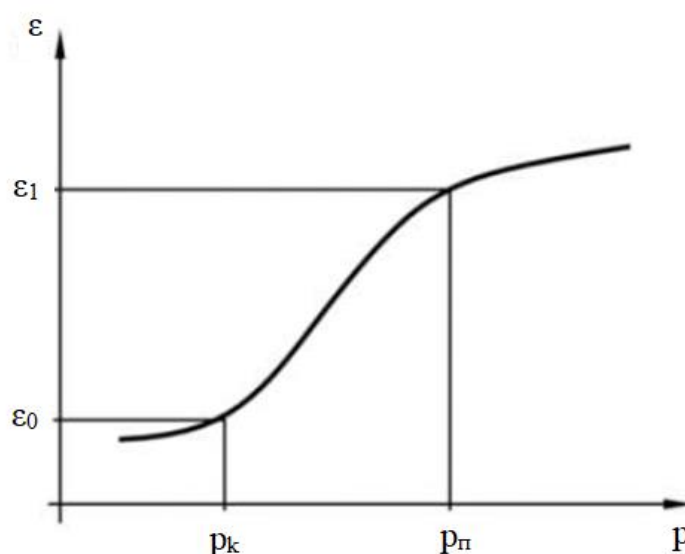


Рисунок 1.3 - Характер зависимости предельной пластичности  $\lambda_p$  от гидростатического давления  $p$ :  $\varepsilon_0$  – пластичность образца при растяжении без давления жидкости;  $\varepsilon_1$  – пластичность образца при определенном давлении;  $p_{\text{п}}$  – величина «порогового давления, МПа;  $p_{\text{к}}$  – величина критического давления, МПа

Вначале, до определенного давления  $p_{\text{к}}$ , пластичность металлов изменяется незначительно или совсем не изменяется. Выше этого критического давления пластичность резко увеличивается, и металлы ведут себя как пластичные материалы.

Таким образом, повышение пластичности под давлением свойственно всем металлам, особенно в условиях высоких температур. Величина этого повышения определяется не только природой, но и исходным состоянием металла [30].

Анализ экспериментов П. Бриджмена по растяжению образцов при ВГД показал, что в процессе опыта давление жидкости не было постоянным. Кроме того, применялись нестандартные (укороченные) разрывные образцы, на которых заранее выполнялась проточка для образования шейки.

П. Бриджмен впервые провёл серию экспериментов по выдавливанию медных и стальных заготовок жидкостью высокого давления. Позднее этот метод английским профессором Х. Пью был назван гидроэкструзией. П. Бриджмен ограничился относительно небольшим количеством опытов, в которых столкнулся с проблемами неконтролируемого истечения металла, больших термических эффектов и разрушения материала при истечении из очка матрицы [31].

В период 1955 – 1959 гг. большой объём работ по исследованию и развитию процесса гидроэкструзии почти одновременно и независимо друг от друга был выполнен Х. Пью с сотрудниками в Английской национальной инженерной лаборатории и Б.И. Бересневым, Л.Ф. Верещагиным, Ю.Н. Рябининым и Л.Д. Лифшицем в Институте физики высоких давлений АН СССР. Работы в этом направлении оказались успешными и перспективными как для улучшения свойств широкого класса материалов, так и для изготовления точных заготовок различных изделий [32].

Рассмотрим имеющиеся в современной технической литературе сведения различных авторов о сопротивлении деформации и предельной пластичности на примере трёх значимых для авиакосмической промышленности сплавов: ВТ6с, 1201, ВТ16.

### **Сплав ВТ6с**

Из сплава ВТ6с изготавливают прутки, профили и т.д. Они свариваются всеми видами сварки, в том числе и сваркой давлением. При электронно-

лучевой сварке прочность сварного шва практически равна прочности основного материала.

Титан обладает минимальной теплопроводностью и высокой прочностью, благодаря чему он широко востребован в сфере производства авиационно-космической техники.

#### **Ключевые преимущества ВТ6с**

- Малая плотность;
- Высокие прочностные характеристики;
- Низкая теплопроводность;
- Высокая пластичность и обрабатываемость механическими методами;
- Устойчивость к температурным перепадам и воздействию агрессивных сред.

#### **Сфера применения титанового сплава ВТ6с**

ВТ6с применяется для изготовления деталей военных и гражданских самолетов, авиационных двигателей, элементов ракет, космических аппаратов, а также изделий медицинского назначения. Изделия из ВТ6с способны выдерживать нагрев до 723 К без потери эксплуатационных качеств.

Сравним *приведенные* результаты исследований сопротивления деформации и предельной пластичности указанного сплава по данным исследователей ИМАШ УрО РАН (кривая 1) [33] и А.А. Фомина (кривая 2) [3] (рис. 1.4). Кривые построены на основании результатов испытаний на сжатие проведенных на кулачковом пластометре. Методика проведения эксперимента представлена в работе [33].

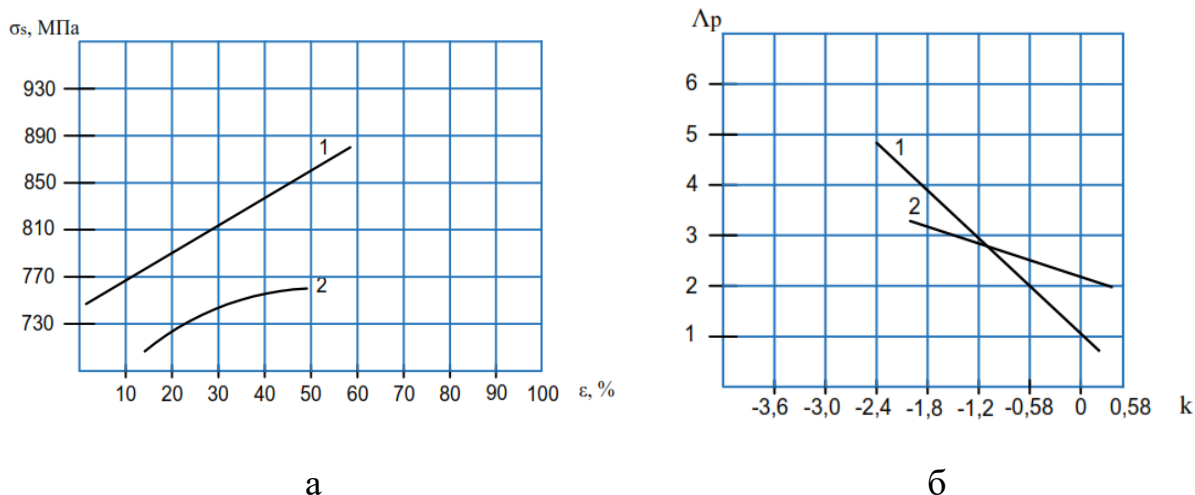


Рисунок 1.4 - Кривые сопротивления деформации (а) и предельной пластичности (б) сплава ВТ6с при  $\theta = 773 \text{ K}$ ;  $\xi = 5 \cdot 10^1 \text{ s}^{-1}$

Проводя анализ данных кривых, можно сделать вывод, что различие в показателях, как  $\sigma_s$ , так и  $\Delta p$  достигает 11-19 %, что является проблемой применения этих данных при разработке новых и усовершенствовании существующих технологических процессов формоизменения сплава ВТ6с.

### Сплав 1201

Сплав 1201 разработан в ВИАМе для замены пластичного алюминиевого сплава средней прочности, содержащего 6 % магния, сплава АМг6. Стало известно, что американцы применяют более прочный, но менее пластичный алюминиевый сплав 2219, содержащий около 6 % меди. В ВИАМе были выполнены лабораторные плавки, которые показали, что сплав, обозначенный 1201, действительно прочнее АМг6. С понижением температуры он не только не охрупчивается, как, например, сталь, а наоборот, приобретает удивительную способность к повышению и пластичности, и прочности (криогенное упрочнение), при неоднократных повторных охлаждениях до температуры жидкого водорода (сплав АМг6 расслаивается), поэтому он не годился для материала ракеты, работающей на жидком водороде.



Для алюминия и его сплавов применяют практически все промышленные способы сварки плавлением и давлением. Газовую сварку в настоящее время используют редко. Существенные затруднения при сварке возникают вследствие легкой окисляемости алюминия в твердом и расплавленном состояниях. Образующаяся тугоплавкая пленка оксида алюминия  $Al_2O_3$  препятствует формированию шва и является источником неметаллических включений в металле шва. Для получения качественных соединений при сварке плавлением необходимы защита шва от насыщения газами атмосферы и принятие специальных мер для удаления или разрушения пленки оксидов [34].

После сварки коэффициент прочности соединений из высокопрочных алюминиевых сплавов составляет примерно 0,7–0,8. Так, при электронно-лучевой сварке плит ( $h = 40$  мм) из сплава 1201 коэффициент прочности достигал 0,75–0,80, в то время как при аргонодуговой многослойной сварке он не превышал 0,5–0,6. Закалка с последующим искусственным старением позволяет довести этот показатель для ряда сплавов до 0,9–1,0 [35].

Анализируя результаты практического исследования  $\sigma_s$  и  $A_p$  сплава 1201, сравним *приведенные* данные ВИАМ (кривая 1) [34] и С.П. Буркина (кривая 2) [35] (рис. 1.5). Автор [36] утверждает, что кривых упрочнения алюминия различных марок в литературе представлено достаточно много. Все они получены при испытаниях на осадку на кулачковых пластометрах в широком диапазоне изменения температуры и скорости деформации, но при достаточно малых степенях деформации. Поэтому использовать эти данные по сопротивлению деформации для технологических расчетов процессов ОМД можно только в рамках принятых допущений с сохранением максимальных значений  $\sigma_s$  при деформациях, превышающих учитываемые при построении приведенном на рис. 1.5 кривых сопротивления деформации сплава 1201. Методика проведения испытаний представлена в работе [33].

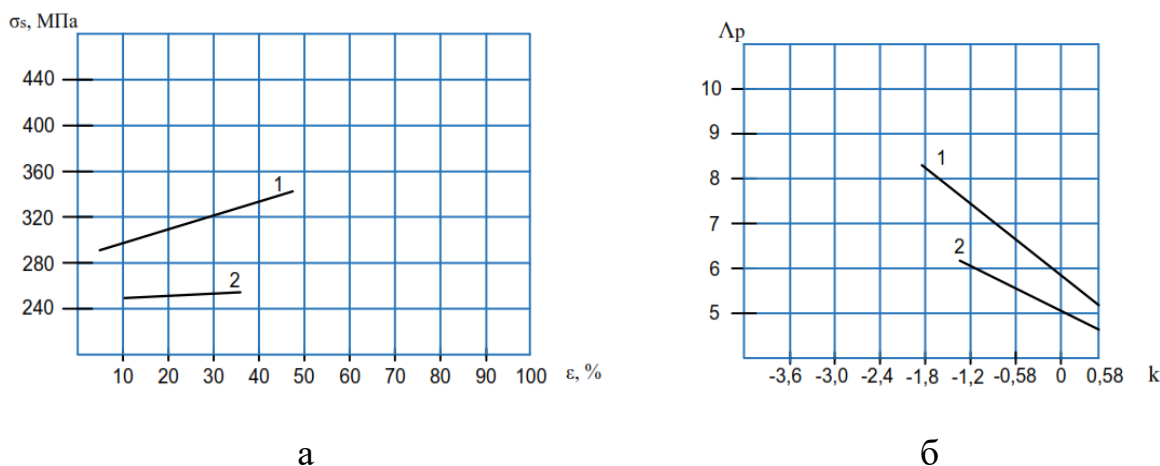


Рисунок 1.5 - Кривые сопротивления деформации (а) и предельной пластичности (б) сплава 1201 при  $\theta = 473 \text{ K}$ ;  $\xi = 10 \cdot 10^1 \text{ c}^{-1}$

Как видно из рис. 1.5 различие данных у разных авторов составляет 11 – 26 %, что показывает значительное несовпадение сведений по реологии сплава 1201.

### **Сплав ВТ16**

Сплав ВТ16 является высокопрочным термически упрочняемым сплавом с коэффициентом  $\beta$ -стабилизации сплава  $K_\beta = 0,75$ . Сплав содержит небольшое количество Al, что несколько повышает прочность и жаропрочность и позволяет сохранить высокую пластичность в отожженном и в закаленном состоянии. Из-за относительно большого содержания молибдена и ванадия сплав ВТ16 эффективно упрочняется при закалке и старении. Выбранное содержание молибдена и ванадия определяет также хорошую свариваемость сплава и обеспечивает высокую пластичность сварного соединения непосредственно после сварки.

Применяется данный титановый сплав для крепежных изделий. Он имеет высокую удельную прочность на растяжение и на срез (приблизительно в 1,5-2 раза выше, чем у обычных легированных сталей). Кроме этого, сплав обладает хорошей коррозионной устойчивостью в атмосфере и в морской воде и довольно высокой прочностью при наличии надрезов [37].

А.А. Фролов проводил испытания на кулачковом пластометре для изучения сопротивления деформации и предельной пластичности титанового сплава ВТ16, при различных скоростях и температурах деформации (кривая 1) [3], а в работах [38, 39] так же получены зависимости сопротивления деформации от степени, скорости и температуры деформации, а предельная пластичность от скорости, температуры деформации и показателя напряженного состояния для исследованного сплава (кривая 2) (рис. 1.6). Кривые построены на основании результатов испытаний на сжатие проведенных на кулачковом пластометре.

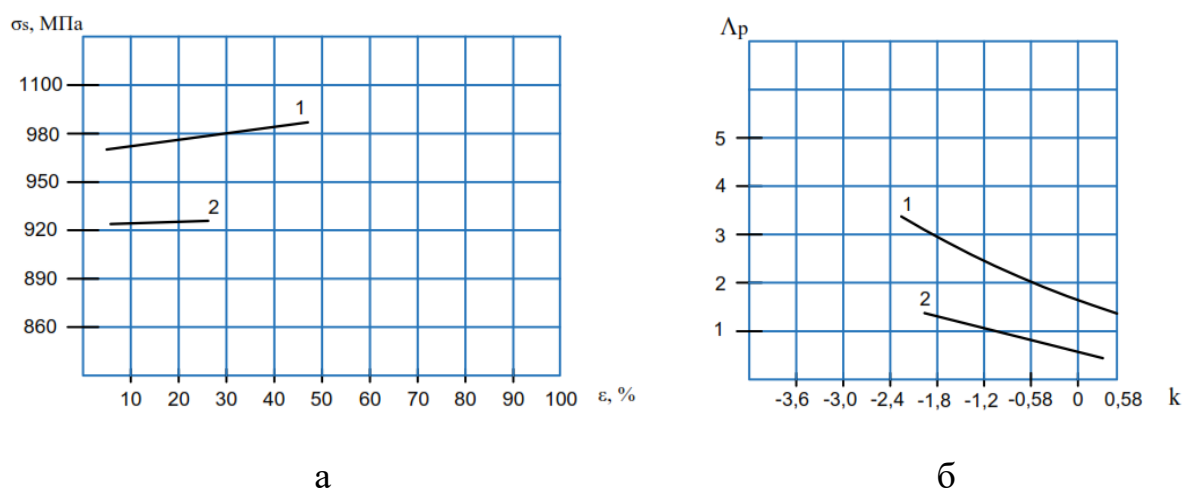


Рисунок 1.6 - Кривые сопротивления деформации (а) и предельной пластичности (б) сплава ВТ16 при  $\theta = 293 \text{ K}$ ;  $\xi = 6 \cdot 10^{-1} \text{ c}^{-1}$

Подводя итог сравнения исследований данного сплава, можно сделать вывод, что на диаграмме сопротивления деформации разница в значениях кривых  $\sigma_s$  различаются на 8-17 %, тогда как для кривых  $\Lambda_p$  – на 7-11 %.

Исходя из имеющихся сведений, на примере только трех важных в авиационной промышленности сплавах, можно сделать вывод, что, фактически, существует область напряженного состояния, в которой испытания металлов не проводятся, а диаграммы (1.1) и (1.2) «достраиваются» экстраполяцией экспериментальных данных (рис. 1.7).

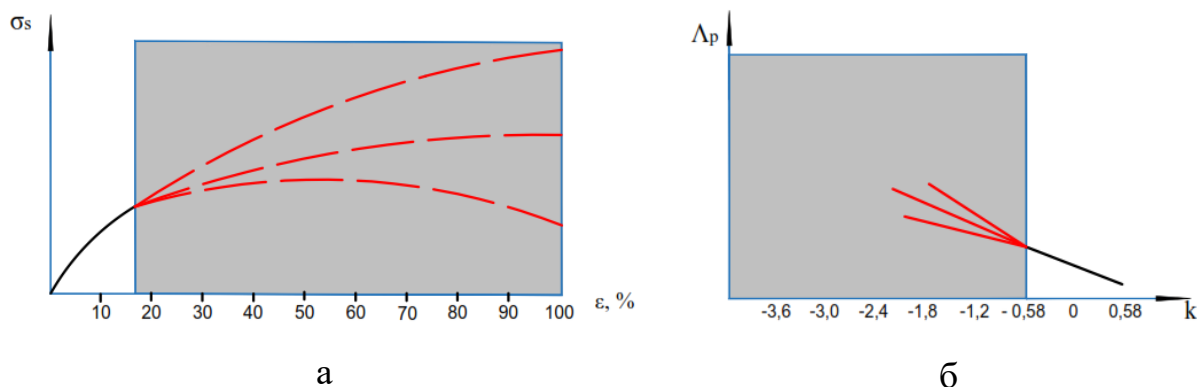


Рисунок 1.7 - Изотермический разрез типовых диаграмм сопротивления деформации (а) и пластичности (б) металлов

Таким образом, исследования сопротивления деформации и предельной пластичности в области отрицательных значений показателя напряженного состояния ( $-0,58 \div -3,6$ ) позволит определить реологические свойства металлов и сплавов непосредственным экспериментом с высокой точностью, что обеспечит возможность разработки новых технологических процессов ОМД и усовершенствование существующих.

### 1.3. Обоснование комплекса теоретических и экспериментальных исследований, положенных в основу создания методов испытаний металлов при высоких гидростатических давлениях и разработка обобщенной схемы исследования

На основе анализа литературный данных по теории ОМД и реологии металлов обоснован комплекс теоретических и экспериментальных методов, необходимых для создания математических моделей ПВД и разработана обобщённая схема исследования сопротивления деформации и пластичности металлов (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 - 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.

## **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1**

1. Из представленного в работе литературного обзора следует, что несмотря на определенные успехи в изучении реологии металлов и сплавов, и создание на этой основе эффективных технологий производства разнообразных изделий, постоянное и углубленное исследование закономерностей поведения металлов при горячей и холодной деформации с использованием современных методик, приборов и установок является существенной необходимостью науки о металлах.

2. Многочисленными исследованиями установлено влияние на реологические свойства металлов температуры, напряженного состояния, степени и скорости деформации. Однако отсутствуют сведения, учитывающие комплексное воздействие высоких гидростатических давлений, температура и скорости деформации на сопротивление деформации и пластичность. Это объясняется тем, что существующие устройства и методы испытаний не позволяют воспроизвести реальные значения указанных параметров на протяжении всего цикла испытаний.

3. Для ряда практически важных в промышленности металлов и сплавов существует область напряженного состояния, в которой испытания не проводятся, а реологические уравнения формируются аппроксимацией экспериментальных данных, полученных в диапазоне, ограниченном возможностями эксперимента.

4. При конструировании определяющих уравнений входящих в математические модели процессов формоизменения, необходимы сведения, полученные при испытаниях металлов в одинаковых условиях нагружения и обработанных по одинаковой расчетной методике в противном случае

погрешность определяющих уравнений внесет непредсказуемую ошибку в математическую модель процесса.

## **ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ В РАБОТЕ**

На основании вышеупомянутого и с учетом современных требований развития ОМД применительно к созданию новых технологических процессов производства изделий для авиационной и других отраслей техники, совершенствования существующих технологических процессов, *целью настоящей работы явилось* установление закономерностей взаимосвязи сопротивления деформации и предельной пластичности металлов со степенью, скоростью, температурой деформации и показателями напряженного состояния имеющими место в процессах ОМД, разработка и внедрение на основе экспериментального исследования новых технологических процессов изготовления биметаллических труб ВТ6с÷1201 и совершенствования процессов холодной прокатки шестигранных прутков из титанового сплава ВТ16.

Исследования проводятся на базе создания новых типов образцов для испытания, пластометров высокого давления, путем разработки математических моделей, описывающих достижение необходимых температурно-скоростных условий при сжатии, растяжении и кручении образцов в режимах однородной деформации при показателях напряженного состояния, имеющих место в процессах ОМД.

Комплекс указанных исследований является основой решения части актуальной и важной научно-технической проблемы создания новых методов и устройств для испытаний металлов в условиях соответствующих процессам ОМД, обеспечивающих разработку и усовершенствование способов формоизменения, имеющей важное народно-хозяйственное значение.

В рамках настоящей работы установленные закономерности изменения сопротивления деформации и предельной пластичности в условиях формоизменения, использованы применительно к разработке нового

технологического процесса изготовления биметаллических труб ВТ6с÷1201 для переходных элементов соединений деталей и узлов из разнородных материалов применительно к деталям ракетной техники и совершенствования процессов холодной прокатки пяти типоразмеров шестигранных прутков из титанового сплава ВТ16 для изготовления деталей крепления конструкций летательных аппаратов

Цель работы предопределила необходимость решения следующих **основных задач**:

1. Разработать пластометр высокого давления, методику и математические модели 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.

## **Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСПЫТАНИЙ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕОЛОГИИ МЕТАЛЛОВ НА ПЛАСТОМЕТРАХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Математические модели процессов ОМД «замыкаются» реологическими уравнениями, точность которых, в значительной степени, определяет точность моделей.

В процессе пластической деформации имеет место сложное взаимодействие деформируемого металла, смазки и инструмента. По существу, имеет место совместная деформация многокомпонентной системы, состоящей из тел с различными реологическими характеристиками.

Решение проблемы создания научных основ установления закономерностей изменения сопротивления деформации и предельной пластичности 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.

### **2.1. Пластометры высокого давления для исследования сопротивления деформации и предельной пластичности металлов**

Для исследования основных показателей, учитывающих поведение металла при различных видах пластической деформации, применяются, как было показано выше, различные виды устройств, однако всем им присущи определенные недостатки (не обеспечивается постоянство напряженного состояния и монотонность деформации в процессе испытания, большой вес, сложность установки и т.д.) Таких недостатков лишены разработанные устройства для исследования сопротивления деформации и пластичности металлов при ВГД. Основными требованиями, положенными в основу создания устройств для испытания металлов, явилось постоянство напряженного состояния и сохранение монотонности деформации в течение

всего опыта, высокая точность определения деформированного состояния в месте разрушения, простота и удобство реализации испытания при высоком гидростатическом давлении, обеспечивающие изменение показателей напряженного состояния в диапазоне, достаточном для анализа различных методов ОМД. Для реализации поставленной задачи были разработаны следующие типы устройств, показанные ниже.

От качества уравнений (1.1) и (1.2) зависит система универсальности математических моделей, которые должны обеспечивать адекватность, точность и экономичность расчетов. Известно, что наиболее достоверные сведения по определению  $\sigma_s$  и  $A_p$  получают в результате исследований, проводимых с использованием кулачковых и торсионных пластометров в широком диапазоне термомеханических режимов деформации по различным законам развития деформации во времени.

Как было показано в главе 1, проникновение в область напряженного состояния путем эксперимента позволит значительно усовершенствовать процессы пластического формоизменения. Этого можно достичь только путем экспериментального определения  $\sigma_s$  по формуле [40]:

$$\sigma_s = \frac{P}{F}, \quad (2.1)$$

Формула (2.1) является корректной только для условий однородной деформации образца во всем диапазоне нагружения. Чтобы обеспечить однородность деформации, необходим соответствующий образец, смазка оптимального для условий испытаний, состава и возможность достижения высоких однородных деформаций путем варьирования показателем напряженного состояния  $k$ .

Вот почему важным фактором в развитии указанного направления является создание нового экспериментального оборудования и методов исследования реологии металлических материалов.

Предпосылками к созданию ПВД являются следующие основные положения:

- существующее оборудование для пластометрических исследований и соответствующие методы не позволяют корректно учесть долю показателя напряженного состояния в уравнении (1.2);

- «гипотеза Людви́ка» предполагает, что  $k$  не влияет на сопротивление деформации (1.2), что было неоднократно подтверждено многими авторами [2, 3];

- при испытаниях на кулачковых и торсионных пластометрах невозможно обеспечить высокие степени однородной деформации на протяжении всего испытания;

- для установления реологических зависимостей приходится применять различные экспериментально-аналитические методы построения соответствующих уравнений;

- данные по сопротивлению деформации и пластичности отличаются у различных авторов на величину 7-26 %.

ПВД позволяют проводить испытания в широком диапазоне температур, степеней и скоростей деформации, имеющих место в процессах ОМД. Они сравнительно просты по конструкции и обеспечивают возможность физического моделирования как отдельных стадий, так и всего технологического процесса. Производство металлических изделий обычно связано с использованием высоких давлений, температур и скоростей деформации, следовательно, получение объективной информации об основных технологических свойствах возможно лишь при проведении испытаний в условиях, близких к производственным.

Наиболее полно этим требованиям отвечает ряд установок, предусматривающих, возможность управления показателем напряженного состояния при пластическом течении, путем использования высоких гидростатических давлений, что позволяет, таким образом, достичь значительной однородной деформации для исследуемых металлов.

По-существу это инновационные пластометры (рис. 2.1 - 2.3).

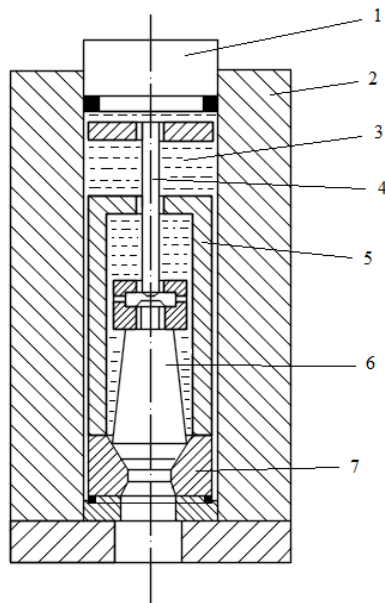


Рисунок 2.1 - Наладка пластометра для испытания образцов на растяжение (а.с. 777543). 1 – пуансон; 2 – герметичный контейнер; 3 – рабочая среда; 4 – испытуемый образец; 5 – стакан; 6 – вспомогательный образец; 7 – матрица

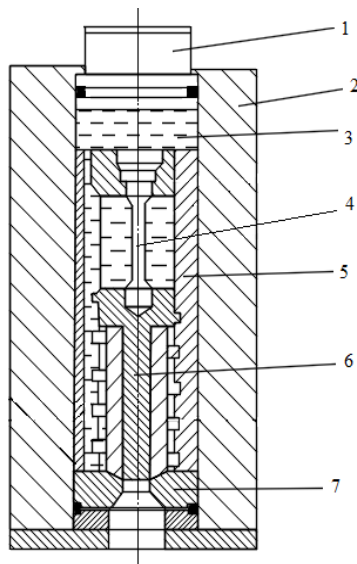


Рисунок 2.2 - Наладка пластометра для испытания образцов на кручение (а.с. 1105780). 1 – пуансон; 2 – герметичный контейнер; 3 – рабочая среда; 4 – испытуемый образец; 5 – стакан; 6 – вспомогательный образец; 7 – матрица

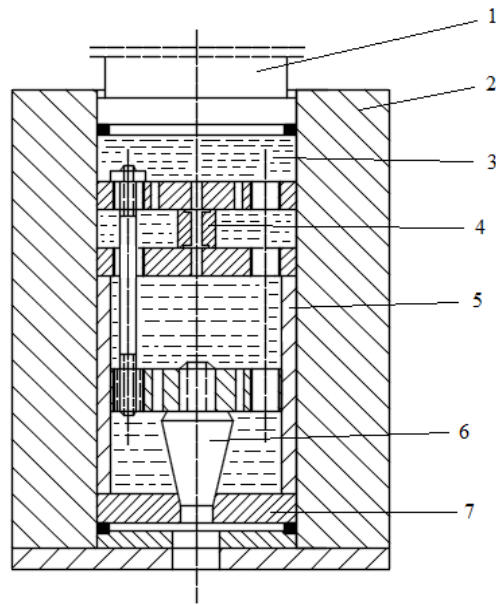


Рисунок 2.3 - Наладка пластометра для испытания образцов на сжатие (Патент RU 2655043). 1 – пуансон; 2 – герметичный контейнер; 3 – рабочая среда; 4 – испытуемый образец; 5 – стакан; 6 – вспомогательный образец; 7 – матрица

Принцип работы пластометров основан на достижении высоких гидростатических давлений в герметичном контейнере 2 в котором находятся: матрица 7, вспомогательный образец 6, предназначенный для обеспечения постоянства скорости деформации при его выдавливании из контейнера, а также испытуемый образец 4 на растяжение, кручение или сжатие. Достижение высоких гидростатических давлений обеспечено сжатием рабочей среды 3.

При внутреннем диаметре контейнера  $3,0 \times 10^{-2}$  м описанные конструкции ПВД позволили создать давление рабочей среды в контейнере до  $2,0 \times 10^3$  МПа.

Материалы для изготовления деталей ПВД следующие: пуансон, контейнер и стакан из инструментальной стали 3Х2В8 (ГОСТ 5950-73) твердость HRC 42-52, уплотнения из меди М1 (ГОСТ 1173-2006) твердость НВ 95, вспомогательный образец из технического алюминия АД1 (ГОСТ 4784-97)

термообработкой сплав АД1 не упрочняется, но его подвергают низкому отжигу (при температурах 423-573 К в течение 1-3 ч, с последующим охлаждением на воздухе).

Для проведения испытаний необходимо выбрать рабочую среду. В условиях эксперимента среда должна удовлетворять требованиям к ньютоновской жидкости [41] и, кроме того, она должна быть термостабильной, нетоксичной, иметь низкую теплопроводность, гидростатичность при температуре испытания и хорошую смазывающую способность, что характеризуется вязкостью. Указанным требованиям удовлетворяют стеклографитовые рабочие среды (графит + стекло №15 в различной пропорции), имеющие вязкость в пределах  $10^3 \div 10^4$  П ( $\lg \eta = 3 \div 4$ ), что достигается варьированием состава. [41].

Зависимость вязкости от состава среды представлена в виде номограммы, удобной для практического применения (рис. 2.4).

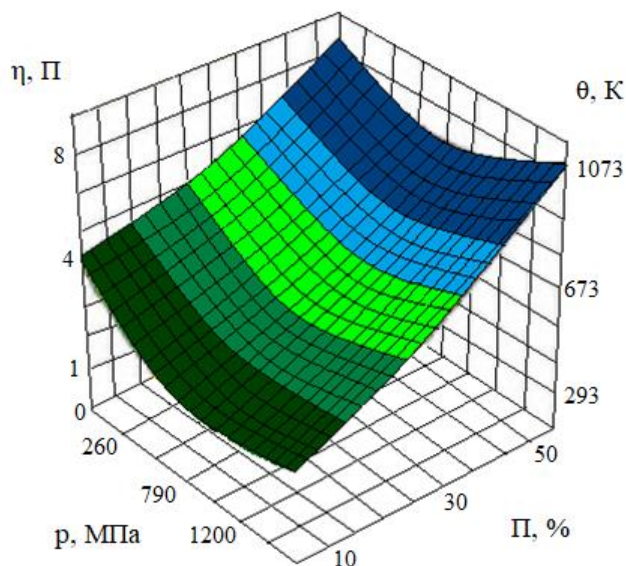


Рисунок 2.4 - Номограмма для расчета состава рабочей среды: графит + стекло №15 (293-1073К)

Номограмма позволяет определить оптимальное содержание стекла в рабочей среде в зависимости от параметров испытаний.

Для среды графит + стекло № 15 (ГОСТ 17022-81) можно пользоваться выражением:

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

Исходя из анализа номограммы, можно сделать вывод, что наибольшее влияние на вязкость рабочей среды оказывает температура. С повышением температуры резко снижается вязкость стекла, в результате чего уменьшается вязкость стеклографитовой среды в целом. Повышение давления в стеклографитовой среде вызывает увеличение коэффициента вязкости, что согласуется с основными выводами механики жидкости. Однако в отличие от жидкостей стеклографитовые среды имеют менее выраженную зависимость вязкости от давления. Такое свойство рабочих сред является положительным, так как обеспечивает устойчивость работы при различных давлениях.

## 2.2. Математические модели пластометров высокого давления [42]

Профилирование вспомогательного образца, обеспечивающее заданные условия развития однородной деформации при испытаниях, может быть основано на законе движения, устанавливающем связь между лагранжевыми  $L_i$  и эйлеровыми  $E_k$  координатами [42].

Наиболее просто связь между этими координатами для описания процессов растяжения и сжатия образцов при их механических испытаниях представляется в виде:

$$L_i = \frac{H_{0i}E_i}{H_i} \quad (2.2)$$

где:  $H_{0i}$  – геометрические параметры вспомогательного образца;

$H_i$  – текущие параметры образца в момент испытания.

Так, при плоской деформации  $H_{0i} = h_0$  - высота, а  $H_{02} = b_0$  - ширина вспомогательного образца;



$H_1 = h$  - текущая высота,  $H_2 = b$  - текущая ширина вспомогательного образца.

При осесимметричной деформации цилиндрического вспомогательного образца от высоты  $H_{01} = h_0$ , до высоты  $H_1 = h$  радиус вспомогательного образца  $H_{01} = R_0$ , а текущий радиус вспомогательного образца  $H_2 = R$ .

При объемной деформации параллелепипеда с размерами  $H_{01} = h_0$ ,  $H_{02} = b_0$ ,  $H_{03} = l_0$  текущие размеры вспомогательного образца представляются соотношениями:

$$H_1 = h, H_2 = b, H_3 = l.$$

Однородная деформация образца по закону движения (2.2) будет обеспечена, если соблюдается условие постоянства объема ( $h_0 \times b_0 = h \times b$ ) при плоской деформации;  $h_0 \times R_0^2 = h \times R^2$  при осесимметричной деформации;  $h_0 b_0 l_0 = h b l$  при объемной деформации и осуществляется пропорциональное изменение ширины и длины вспомогательного образца  $b_0 l_0 = b l$  при объемной деформации.

Учитывая равенство нулю полной производной  $L_i$ - по времени  $t$ :

$$\frac{\partial L_i}{\partial t} + \nabla L_i \times \vec{v} = 0 \quad (2.3)$$

с помощью (2.2) легко определяются компоненты  $v_i$ , вектора скорости  $\vec{v}$ , движения материальных частиц испытываемого материала во всем очаге деформации:

$$v_1 = \frac{E_1}{h} \times \frac{\partial h}{\partial t}; v_2 = a \times \frac{E_2}{h} \times \frac{\partial h}{\partial t}; v_3 = c \times \frac{E_3}{h} \times \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.4)$$

где, для плоской деформации  $a^* = 1$ ,  $c = 0$ , для осесимметричной деформации  $a = \frac{1}{2}$ ,  $c = 0$ , для объемной деформации  $a = c = \frac{1}{2}$ .

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

$$h = h_0 \pm \Delta h f(t) \quad (2.5)$$

где  $\Delta h$  - конечное абсолютное изменение высоты образца;  $f$  - безразмерная функция времени, удовлетворяющая граничным условиям:

$f(t) = 0$  и  $f(t) = 1$ . Знаку плюс соответствует растяжение, знаку минус сжатие.

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

$$\xi_u = \frac{\Delta h \chi}{h} f \quad (2.6)$$

где, для плоской деформации  $\chi = \frac{2}{3}$ , а для осесимметричной и объемной деформации  $\chi = 1$ .

Для испытаний с постоянной интенсивностью скоростей деформаций  $\varepsilon_{ii} = \xi$ , решением дифференциального уравнения (2.6) с учетом (2.5) находим:

$$f = \pm \frac{h_0}{\Delta h} (e^{\pm \frac{\xi \times t}{\chi}} - 1) \quad (2.7)$$

Подстановка соотношения (2.7) в (2.6), 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:

$$r = \pm k_p h_0 (e^{\pm \frac{\xi \times t}{\chi}} - 1) + r_6 \quad (2.8)$$

Отметим, что если в формуле (2.8) использовать знак «минус» сжатие, а время  $t$  заменить отношением угла  $\alpha_6$  поворота барабана к угловой скорости  $\omega_6$  его вращения ( $t = \frac{\alpha_6}{\omega_6}$ ), то при  $K_p = \chi = 1$  формула (2.8) будет точно совпадать с результатами работы, полученными другим способом [43].

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. 2.5) [42].

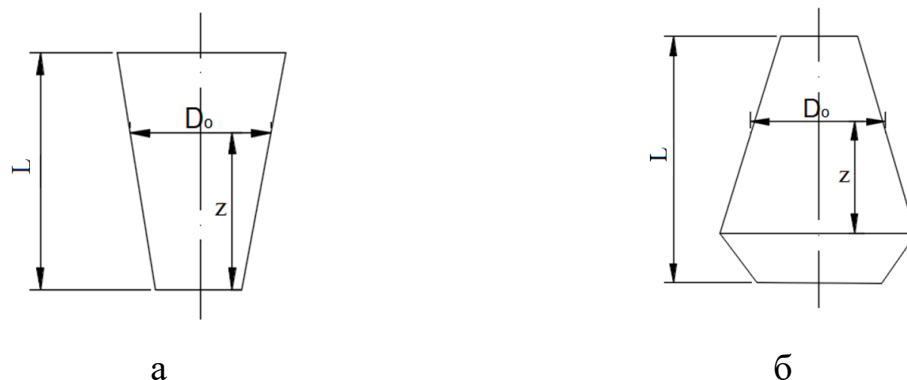


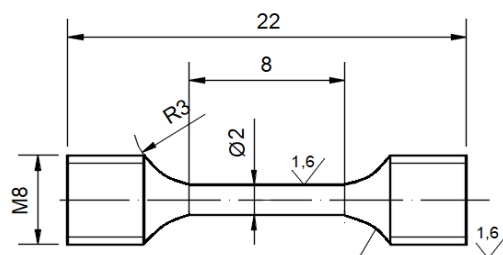
Рисунок 2.5 - Форма вспомогательного образца для испытаний:  
а) на растяжение; б) на сжатие

При растяжении и сжатии на описанном устройстве 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:

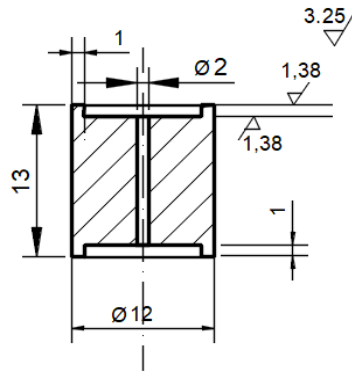
$$D_0 = d_M \sqrt{\frac{v_D}{(h_0 \pm z) \times \xi_H}} \quad (2.9)$$

где, как и ранее, знаку "плюс" соответствует растяжение, а "минус" - сжатие.

Для испытаний на растяжение и сжатие использовали цилиндрические образцы при следующих исходных данных:  $h_0 = 20$  мм;  $d_B = 6$  мм;  $\xi = 7 \cdot 10^1$  с<sup>-1</sup>; (рис. 2.6, а),  $h_0 = 13$  мм;  $d_0 = 10$  мм;  $\xi = 7 \cdot 10^1$  с<sup>-1</sup> (рис. 2.6, б).



а



б

Рисунок 2.6 - Форма и размеры образцов для испытаний на растяжение, кручение (а) и сжатие (б) при высоких гидростатических давлениях

Сначала с помощью формулы (2.7) при  $f = 1$  определяем время деформирования:

$$t_K = \pm \frac{\chi}{\xi^*} \ln\left(1 \pm f \frac{\Delta h}{h}\right) = \pm \ln(1 \pm 0,8) \quad (2.10)$$

При растяжении используем знак «плюс» и получаем  $t_K = 0,588$  с, а при сжатии знак «минус»  $t_K = 1,609$  с. Из формул (2.4) легко получить соотношение между скоростью деформации  $\xi_1$  и скоростью  $v_1$  в направлении деформирования  $\xi_1 = \frac{v_1}{h}$ .

Величина  $z$  (2.2.8) рассчитывается по формуле, аналогичной формуле (2.8):

$$z = \pm h_0 \left( e^{\pm \frac{\xi \times t}{\chi}} - 1 \right) \quad (2.11)$$

Откуда имеем при  $t = 0$  величина  $z = 0$ , при  $t = t_z$   $z = 0,008$  м. Из формулы (2.23) видно, что при  $E_1 = \pm h$  (поверхность образца) значение скорости  $v_1 = -\frac{\partial h}{\partial t}$ . Величину  $\frac{\partial h}{\partial t}$  найдем с помощью (2.6), учитывая (2.7):

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \pm \frac{h_0 \xi}{\chi} * e^{\pm \frac{\xi t}{\chi}} \quad (2.12)$$

Откуда находим, что при  $t = 0$  модуль скорости  $|v_1| = 0,0001$  м/с, а при  $t = t_K$  в случае растяжения  $|v_1| = 0,0018$  м/с и в случае сжатия  $|v_1| =$

0,002 м/с. Ясно, что скорость истечения в (2.9) должна быть больше максимальной скорости  $|v_1|$  в интервале  $0 \leq t \leq t_k$ . Во время испытаний, скорость деформирования поддерживается на уровне  $v_d = 0,03$  м/с. Тогда по формуле (2.9) получим для растяжения  $D_0 = 0,004$  м при  $t = 0$  и  $D_0 = 0,009$  м при  $t = t_k$ . Для сжатия  $D_0 = 0,004$  м при  $t = 0$  и  $D_0 = 0,009$  м при  $t = t_k$ . Изменение величин  $D_0$  в зависимости от  $\frac{t}{t_k}$ , при заданных в рассматриваемом примере условиях, показано на рис. 2.7.

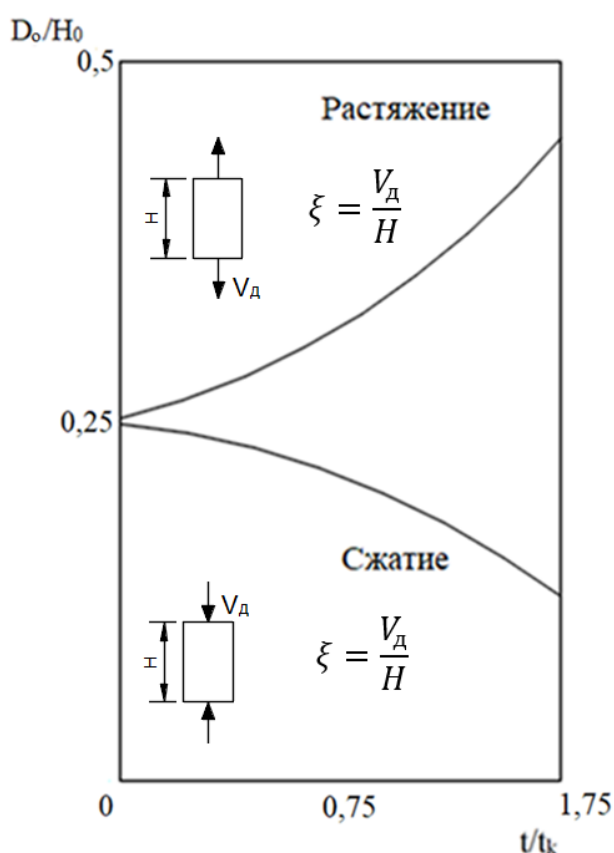


Рисунок 2.7 - Зависимость геометрических параметров вспомогательного образца от времени деформирования

В табл. 2.1 представлена классификация процессов ОМД по величине средней скорости деформации  $\xi_{cp} c^{-1}$  [43].

Таблица 2.1 – Классификация процессов ОМД по величине средней скорости деформации  $\xi_{\text{ср}} \text{с}^{-1}$

№ <sub>пп</sub>	Процесс ОМД	$\xi_{\text{ср}} \text{с}^{-1}$
1.	Изостатическое (изотермическое) деформирование	$10^{-5} \div 10^{-4}$
2.	Прессование (на гидравлических прессах)	$10^{-3} \div 10^{-2}$
3.	Горячая прокатка	$10^{-2} \div 10^1$
4.	Холодная прокатка	$10^0 \div 10^2$
5.	Волочение	$10^1 \div 10^2$
6.	Штамповка на прессах (КГШП)	$10^1 \div 10^2$
7.	Ковка на молоте	$10^1 \div 10^3$
8.	Электроимпульсивная и взрывная штамповка	$10^3 \div 10^4$ и более

Как видно из представленной классификации, **скорость деформации** связана с понятием **скорости деформирования**, которым определяется скорость движения инструмента (молота, пресса, валков прокатного стана и т.д.). Выражения 1.1 и 1.2 (см. выше, глава 1) показывают, что по средствам скорости деформации можно управлять как сопротивлением деформации, так и пластичностью, причем ее влияние может проявляться по-разному. Для разных металлов установление закономерностей взаимосвязи сопротивления деформации и предельной пластичности со скоростью деформации носит феноменологический характер и не предусматривает изучение процессов упрочнения и разупрочнения, а также связанных с ними структурных изменений в металле. Для решения задач ОМД методами теории пластичности этого вполне достаточно.

### **2.3. Моделирование процесса осадки цилиндрического образца с торцевыми выточками и отверстием [46]**

Исследован процесс ОМД – осадка цилиндрического образца. Представлено его напряженно-деформированное состояние, как в процессе стандартной осадки, так и при различных технологических режимах. Математическое моделирование выполнено с помощью программы QForm 3D.

В трудах В. Л. Колмогорова были сделаны выводы о необходимости создания новых типов образцов для испытаний [8 и др.].

Осадка – процесс ОМД, заключающийся в деформации между плоскопараллельными поверхностями цилиндрической или призматической заготовки, при котором уменьшается её высота и увеличивается поперечное сечение. НДС в заготовке зависит от коэффициента трения на торцевых контактных поверхностях, а также от размеров заготовки. Силы трения на контактных поверхностях создают в деформируемом теле схему объемного-напряженного состояния и влияют на характер распределения деформаций, как в осевом, так и в радиальном направлении [44].

Цель моделирования изучить НДС заготовки при осадке, рассмотреть распределение контактных касательных напряжений на торце заготовки, показать влияние силы трения на процесс деформирования, проанализировать различные способы воздействия в процессе осуществления осадки и выбор конструкции образца для дальнейших исследований.

В работе исследовано НДС цилиндрического образца с торцевыми выточками и центральным отверстием, заполненным смазкой, при осадке, с учетом технологических параметров (скорость деформации, степень деформации, температура, смазка [3, 12]), путем проведения численного эксперимента, с применением конечно-элементного анализа для определения оптимальных размеров образца.

Осуществлены численные эксперименты по осадке на примере 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. Наиболее точный результат моделирования получается тогда, когда значение коэффициента трения равно 0,099.

Исследован процесс осадки образцов с диаметрами отверстий:

- а) меньше 1 мм;
- б) от 1 до 2 мм;
- в) больше 2 мм.

Напряженно-деформированное состояние оценивалось в зависимости от условий трения на контактных поверхностях инструмента и образца, формы, размеров осаживаемого образца и температурно-скоростных параметров деформации. 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 [45]:

$$\Delta \cdot T_{\sigma} + \rho \vec{F} = \rho \frac{d\vec{V}}{dt}, \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} + \Delta \cdot \vec{V} = 0, \quad (2.14)$$

$$\sigma_{ik} - \sigma \delta_{ik} = \frac{T}{H} \left( \frac{\sigma V_i}{\partial x_k} + \frac{\partial V_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \delta_{ik} \right), \quad (2.15)$$

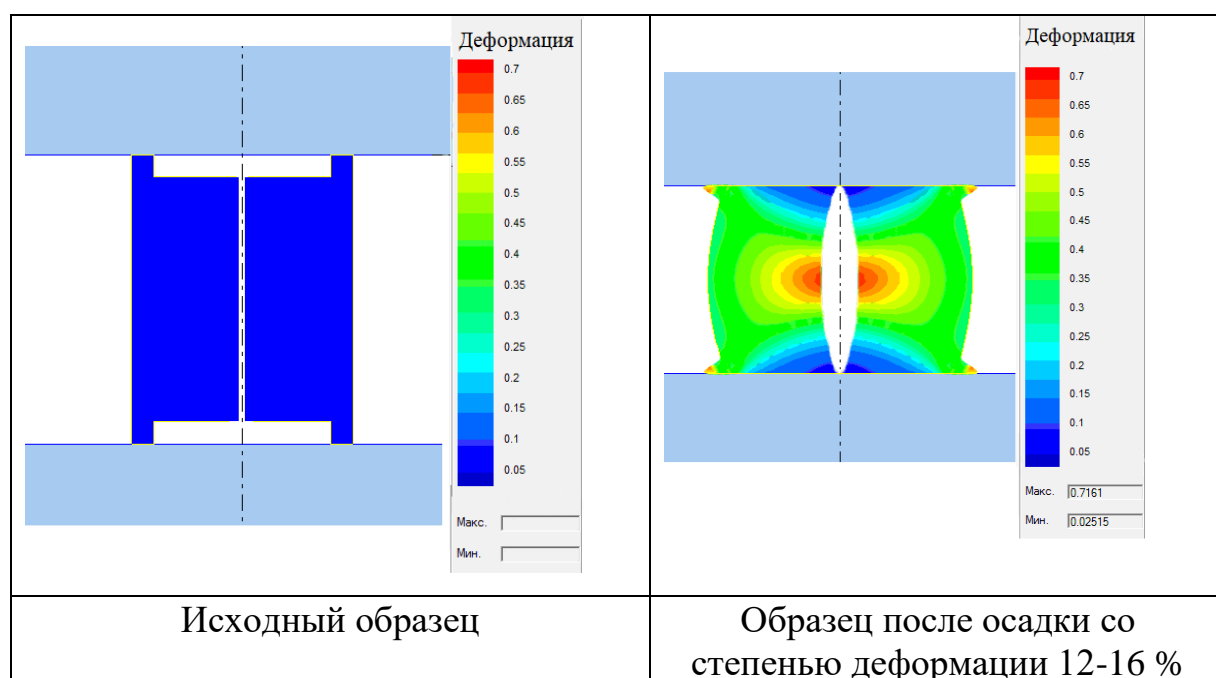
$$T = T(H, \theta), \quad (2.16)$$

Система уравнений (2.13) - (2.16) включает дифференциальные уравнение движения (2.13), уравнения неразрывности среды (2.14), уравнение связи девиаторов напряжений и скоростей деформаций (2.15) и уравнение состояния (2.16). Решение системы уравнений осуществлено с учетом граничных условий в скоростях и напряжениях с применением метода конечных элементов.

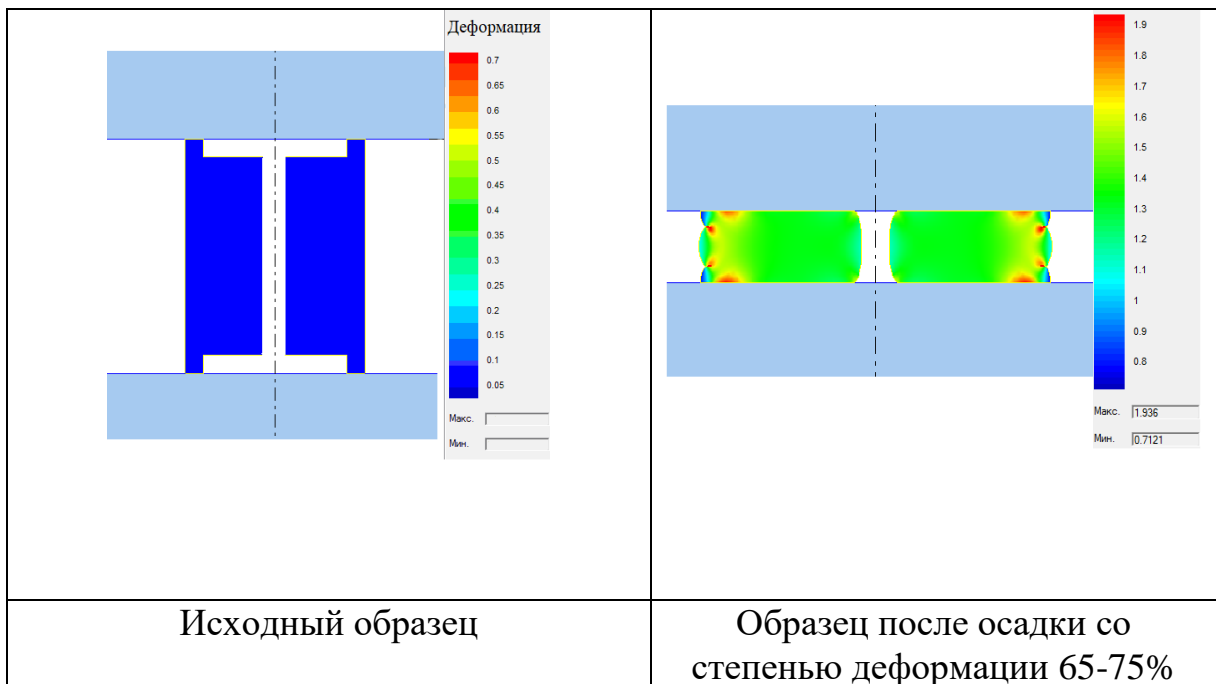


Математическая модель процесса осадки цилиндрического образца с торцевыми выточками и отверстием заполненным смазкой учитывает реологию материала и контактные условия.

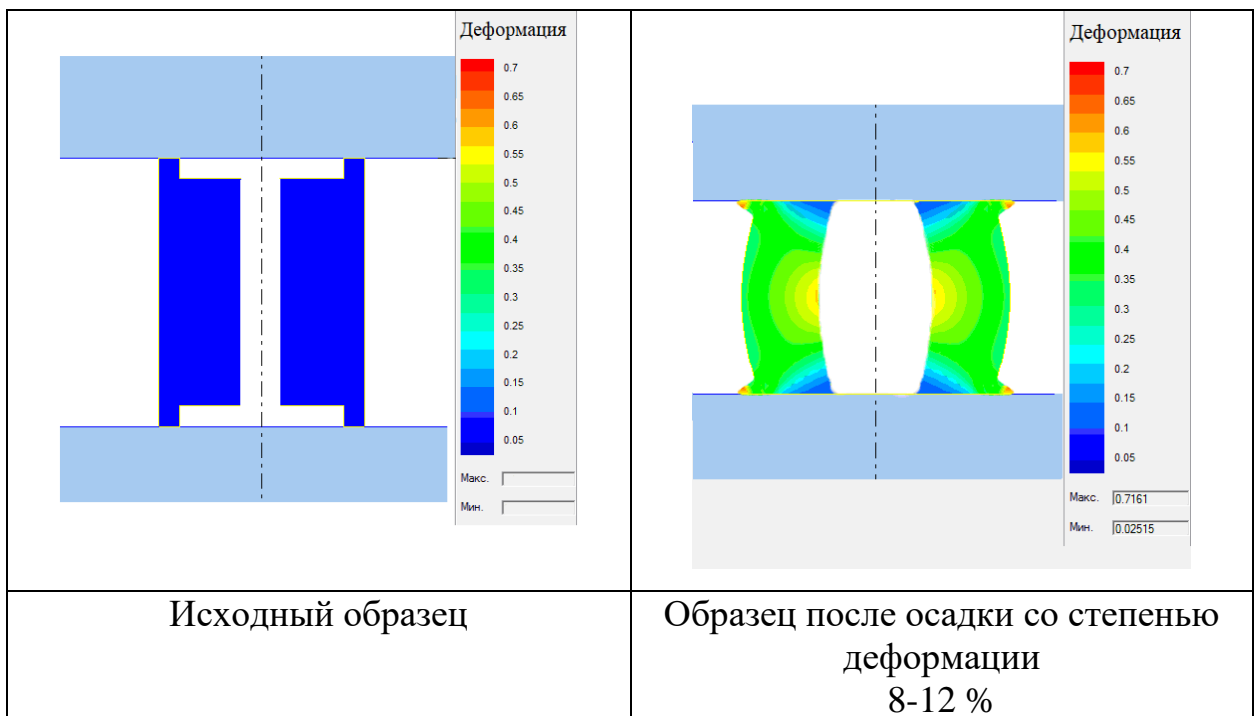
Численный эксперимент позволил оценить влияние деформации на осадку образцов на гидравлическом прессе, с учетом сопротивления деформации материала и условий трения [46, 47]. Полученные сведения представлены на рис. 2.8, а именно, CAD модель исходного образца и результат компьютерной симуляции осадки [48].



а) Диаметр отверстия меньше 1 мм



б) Диаметр отверстия от 1 до 2 мм



в) Диаметр отверстия больше 2 мм

Рисунок 2.8 - Результаты компьютерной симуляции осадки цилиндрических образцов с торцевыми выточками и отверстием различного диаметра

Анализ результатов исследований показал, что при отношении  $\frac{d_{\text{отв}}}{H_{\text{обр}}} < \frac{1}{13}$ , где  $d_{\text{отв}}$  - диаметр отверстия, а  $H_{\text{обр}}$  – высота образца, происходит сужение отверстия (рис. 2.8 а), что позволяет достичь степени однородной деформации не более 12 – 16%.

При анализе процесса осадки образца с торцевыми цилиндрическими выточками и отверстием, при соотношении  $\frac{d_{\text{отв}}}{H_{\text{обр}}}$  от  $\frac{1}{13}$  до  $\frac{2}{13}$ , видно, что при приложении нагрузки, материал образца деформируется от центра к периферии и по высоте. 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 % (рис. 2.8 б).

На рис. 2.8 в видно, что 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%, в то же время необходимые механические свойства на примере исследованного сплава ВТ16 достигаются при деформации выше 33 - 40% [33].

По результатам численного моделирования разработана конструкция цилиндрического образца с торцевыми выточками и отверстием (рис. 2.9).

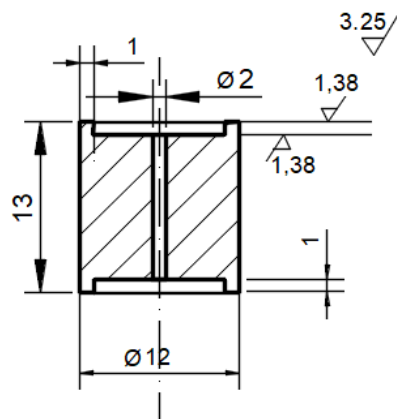


Рисунок 2.9 - Образец для испытаний материалов на сжатие  
(Патент РФ RU 2627957 с1)

В дальнейшем все испытания образцов на сжатие были осуществлены на образцах выполненных по чертежу на рис. 2.9.

Постоянный контроль однородности деформации осуществляли по коэффициенту однородности деформации « $\mu$ » (рис. 2.10).

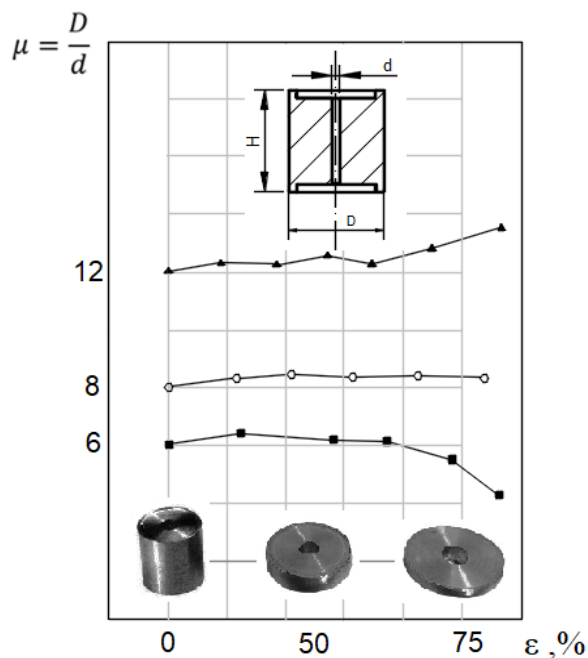


Рисунок 2.10 - Оценка степени однородности деформации по коэффициенту  $\mu$ : ▲ –  $\mu = 12$ ; ○ –  $\mu = 8$ ; ■ –  $\mu = 6$

Проверка адекватности компьютерного моделирования процесса осадки экспериментальных образцов новой конструкции в QForm 3D осуществленный для каждого цикла осадки сравнением параметров реального образца с параметрами компьютерного моделирования. Параметры объекта моделирования установлены путем эксперимента по осадке образца на ПВД в лабораторных условиях.

#### **2.4. Разработка методики испытаний металлов на сжатие, растяжение и кручение при высоких гидростатических давлениях**

В качестве объекта исследования были выбраны сплавы, которые в сортаменте выпускаемой продукции заводов авиационной металлургии занимают значительный удельный вес и которые широко используются в составе изделий авиационно-космической технике. Это сплавы ВТ6с, 1201 и ВТ16.

Для достижения цели исследования необходимо было решить задачу построения диаграмм сопротивления деформации и пластичности в диапазоне температур, деформаций и скоростей деформаций в комплексе с показателями напряженного состояния имеющими место, в практически, во всех видах ОМД. Как было показано выше, в настоящее время таких сведений в литературе и материалах промышленных и научных исследовательских организаций в полном объеме нет.

Для исследований применили испытания на сжатие, растяжение и кручение на ПВД, разработанных в МАИ. Все типы пластометров, способы испытаний и образцы созданы впервые и запатентованы.

Для построения диаграмм  $\sigma_s$  использовали, в основном, испытания на сжатие, а для построения диаграмм  $A_p$  – все вышеуказанные виды испытаний. Главным требованием к методике испытаний на сжатие явилось обеспечение однородности деформации на протяжении всего цикла испытаний, а для всех трех видов испытаний – постоянство скорости деформации.

По кривым усилие - путь однозначно определяли степень и сопротивление деформации. Проверку степени однородности деформации осаженных образцов осуществляли:

- визуально по отсутствию бочкообразования при замере в разных по высоте образца местах на инструментальном стерео микроскопе Saike Digital SK2100HDMI-T2;

- измерением твердости в меридиальном сечении и на поверхности (различие твердости при однородной деформации не более чем на 2 единицы).

Для замера усилия применялась кольцевая месдоза с фольговым датчиком до 2200 кН (гидравлическая месдоза), устанавливаемая на верхней плите с шаровой опорой пуансона. Перемещение регистрировали тензометрической балкой-ходографом. Все тарировки отличались стабильностью и имели линейный характер. Для записи усилий и перемещений использовали цифровой осциллограф Atten (Gratten) GA1102CAL (2 канала x 100 мгц). Применение двухканального электронного тензометрического усилителя SEM1600B с полосой пропускания частот до 6 кгц, гарантирует отсутствие искажений при записи, так как максимальное значение собственной частоты процесса в 3-5 раз меньше. Оценка методами дисперсионного анализа точности кривых  $\sigma_s$  показала, что суммарная погрешность с достоверностью 0,95 составляет около 6%.

Основным элементом месдозы, является упругий элемент, помещённый между массивными деталями, представляющими собой ступенчатый цилиндр. Обычно вся конструкция помещается в защитный кожух. Мездоза – род или часть динамометра, силоизмерительное устройство, как правило, основана использование тензометрических или манометрических датчиков. Часто словом «месдоза» обозначают только сам упругий элемент динамометра или динамографа.

Размеры и материал упругого элемента подбирали так, чтобы напряжения в нем были как можно больше (для повышения точности измерений), однако не превышали предел упругости.

Тензометрические датчики (TSG-S01) на упругом элементе соединяли в мостовую схему. При изменении сопротивления датчиков возникает ток разбаланса, пропорциональный упругой деформации. Существует большое количество разнообразных конструкций месдоз, которые различаются формой упругого элемента (цилиндр, кольцо, шар), типом применяемого датчика (емкостные, индуктивные, магнитоупругие и др.), а также конструктивным оформлением вспомогательных элементов (элементы для крепления месдозы, ее герметизации; выводы проводов; охлаждения и т.д.) Для получения более точных результатов месдозы следует располагать в зоне непосредственного действия измеряемого усилия. Например, при измерении усилия прокатки месдозу устанавливают под нажимными винтами стана, при определении усилияковки - под нижним бойком и т.д.

Тарировку месдоз производили до и после экспериментальных исследований на гидравлическом прессе усилием 1 МН, с предварительной отработкой всех режимов нагружения (рис. 2.11).

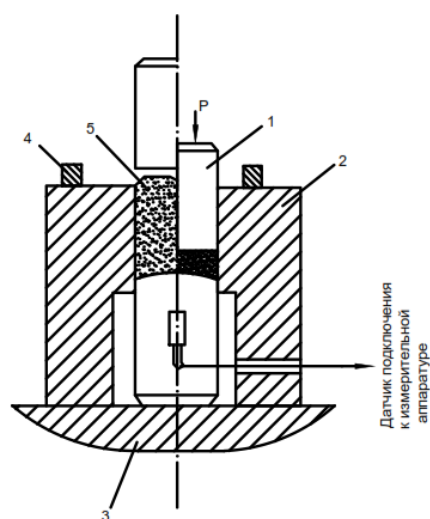


Рисунок 2.11 - Гидравлический пресс TS1605-4 усилием 1 МН

Для тарировки точечной месдозы, на участке рабочей поверхности инструмента с вмонтированной в него точечной месдозой, размещали

прокладку 5 из порошкового материала, заключенного в контейнер, и нагружали через прокладку рабочей поверхности штифта 4, одновременно с участком рабочей поверхности инструмента 1, при этом фиксировали общее давление деформирования и деформацию месдозы, после чего строили тарировочный график зависимости вида (кривая 1) (рис. 2.12):

$$E = f(P) \quad (2.17)$$

где  $E$  – деформация месдозы, выраженная в единицах сопротивления тензорезисторов, МПа;  $P$  – давление деформирования, МПа.

Для определения величины погрешности тарировки, связанной с потерями общего давления, деформирования на трение порошкового материала о поверхность контейнера, и уточнения тарировочной характеристики, нагружали в дополнительном контейнере 2, предварительно оттарированный, например, на испытательном прессе, контрольной пуансон 3, через прокладку из свободно насыпанного порошкового материала. Причем использовали прокладки с такими же параметрами, как и при тарировке, а профиль поверхности контакта контрольного пуансона с порошковым материалом выполнялся точно таким же, как и профиль инструмента. При этом фиксировали общее давление деформирования и давление на контрольный пуансон, после чего получали зависимость (кривая 2) (рис. 2.12):

$$P_{\partial} = f(P) \quad (2.18)$$

где  $P_{\partial}$  – давление на нижний пуансон, которое приравнивается к давлению на контактной поверхности инструмента, МПа.

С помощью полученной зависимости оценивали погрешность тарировки, связанную с потерями давления деформирования, на трение порошкового материала о внутреннюю поверхность контейнера, и корректировали тарировочный график (рис. 2.12).



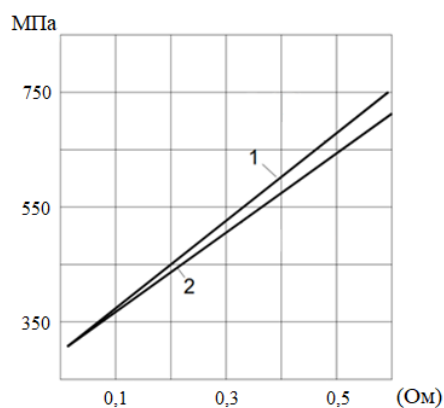
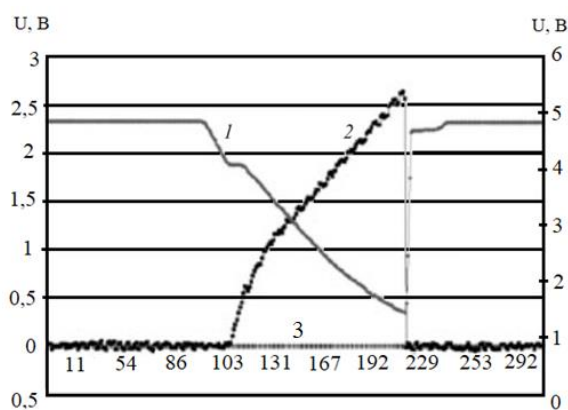


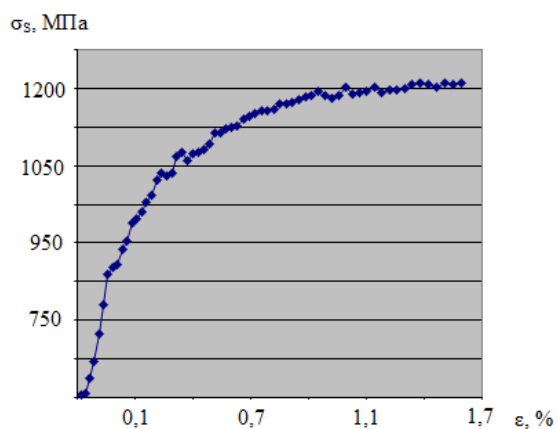
Рисунок 2.12 - График тарировки месдозы

Достоверность результатов испытаний зависит не только, от преимуществ принципов, заложенных в конструкцию устройства, но и в значительной мере от техники эксперимента, его приборного оснащения и обработки экспериментальных данных (рис. 2.13).



Результат регистрации процесса осадки на компьютере

а



Результат обработки данных – кривая сопротивления деформации

б

Рисунок 2.13 - Диаграмма компьютерной регистрации и обработка результатов испытания

где: 1 – перемещение пуансона; 2 – изменение усилия осадки; 3 – шкала временных точек отсчета. Шкала ходомера (слева) – 2,47 мм/В; Шкала мессдозы (справа) – 47,72 кН/В

Для построения компьютерной диаграммы и обработки результатов испытаний применяли метод испытания на сжатие нового типа образца (см. выше рис. 2.9).

Исследования проведены на ПВД, работающем следующим образом (рис. 2.14) [49]. Описание работы приведена применительно к испытанию на сжатие.

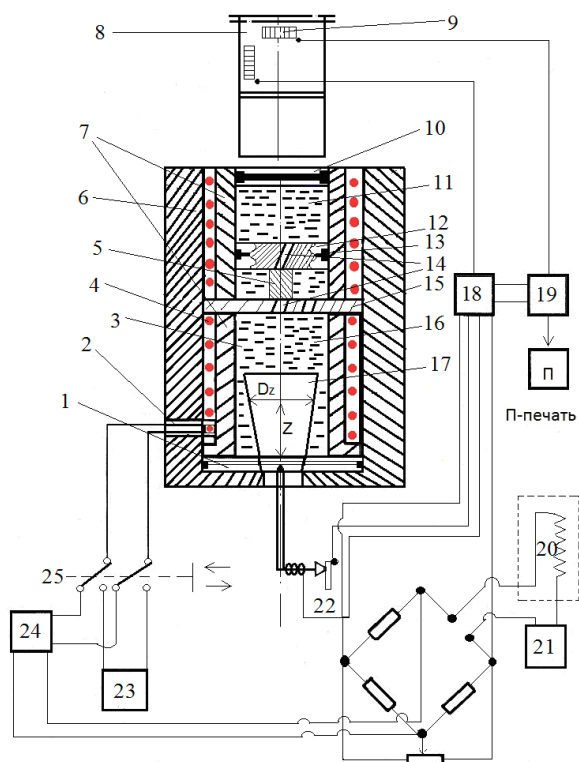


Рисунок 2.14 - Схема ПВД для испытаний материалов при высоких гидростатических давлениях с прецизионным нагревом образцов и одновременным безинерционным контролем температуры, записи и обработки статических и кинематических параметров испытаний

Вспомогательный образец 17 размещают на матрице 1, после чего на матрицу устанавливают опору 7 с плитой 15, содержащей канал 14. Затем

контейнер 6 заполняют рабочей средой 16, в которую полностью погружают испытуемый образец 5, а на его торцевую поверхность устанавливают верхнюю плиту 12 с каналом и уплотнением 13 и заполняют объем 11 рабочей средой. После этого вводят в контейнер плунжер 10, обеспечивая при его перемещении повышение гидростатического давления рабочей среды, передающей усилие на верхнюю плиту. При перемещении верхней плиты начинается деформация испытуемого образца и повышение гидростатического давления в нижнем объеме. При достижении необходимого гидростатического давления для деформации вспомогательного образца начинается его выдавливание через осевое коническое отверстие матрицы. Так как вспомогательный образец выполнен профилированным и имеет форму усеченного конуса, то с его истечением возрастает гидростатическое давление в нижнем объеме. В следующий момент под действием плунжера возрастает гидростатическое давление в верхнем объеме и перемещается верхняя плита, воздействуя на испытуемый образец, а также повышается гидростатическое давление в нижнем объеме, необходимое для деформации вспомогательного образца. Таким образом, происходит непрерывное перераспределение гидростатического давления между верхним и нижним объемами 11 и 3 в течение всего процесса испытания, обеспечивая постоянство скорости деформации образца, что позволяет повысить точность испытаний.

Для поддержания заданной температуры испытаний в пределах  $\pm 1^\circ$  устройство снабжено двухступенчатой системой регулирования и замера температуры. Первая ступень включает обогрев контейнера высокого давления и состоит из кольцевой электропечи с терморегулятором, обеспечивающим (без второй ступени) перепад температуры в рабочем пространстве  $\pm 5^\circ$ . Вторая ступень представляет собой резистивный нагреватель – термопару (ТС12-А), принцип работы которой для обеспечения испытаний при высоких гидростатических давлениях состоит в следующем. Спираль 4 диаметром  $2,0 \times 10^{-2}$  м из сваренных между собой проволок Pt и

Pt+10%Rh диаметром  $5,0 \times 10^{-4}$  м намотана на изолированную внешнюю поверхность опоры и окружена слоем термоизоляции. Сформированный таким образом нагреватель – термопара подсоединяется к вакуумплотным электрическим вводам 2, находящимся внутри контейнера. К этим же вводам с внешней стороны контейнера через механический прерыватель 25 попеременно, с частотой 25-40 Гц подключается источник напряжения 24 и прибор, регистрирующий электродвижущую силу термопары 24.

К достоинствам использованной схемы следует отнести отсутствие искажения теплового поля, обычно вносимое термодатчиками, возможность практически точного и безынерционного нагрева, измерения и воспроизведения температуры, и наличие всего одного термоизолирующего уплотнения в контейнере высокого давления за счет исключения необходимости ввода термодатчика.

Для измерения гидростатического давления в контейнере, силовых и кинематических параметров нагружения образца устройство оснащено специальными датчиками. Сигналы от датчиков давления 9 (НМР 331-А-S), перемещения 22, пройдя через сопротивление 21 и манганиновый манометр 20 поступают в систему сигнал-код 18 и микропроцессор 19 (Intel Celeron) для расчета и выдачи на печать параметров напряженного и деформированного состояния образца при испытании с последующей статистической обработкой экспериментальных данных для построения диаграмм сопротивления деформации.

## **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2**

1) Разработана методика проведения исследования предельной пластичности. Методика включает: подготовку образцов для испытания на сжатие и растяжение; расчет параметров вспомогательного образца; выбор рабочей среды; наладку установки; планирование и последовательность проведения эксперимента и обработки результатов испытания для трех

скоростей деформации охватывающих основные виды ОМД ( $2 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1} \div 9 \cdot 10^1 \text{с}^{-1}$ ).

2) Разработаны математические модели испытаний образцов на растяжение и сжатие на пластометрах высокого давления, в условиях однородной деформации (от 65 до 75%) с показателями напряженного состояния, имеющими место в реальных процессах обработки металлов давлением ( $0,58 \div -3,6$ ). В состав математических моделей входят: закон движения, скорость деформации, закон изменения  $H$ , высота вспомогательного образца. Выведено уравнение для расчета исполнительного механизма, построена соответствующая диаграмма.

3) Анализ результатов исследований 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 %. Когда отношение  $\frac{d_{\text{отв}}}{H_{\text{обр}}} > \frac{2}{13}$  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%.

4) Создана линейка ПВД и разработана методика, позволяющая проводить испытания материалов на сжатие, растяжение и кручение в широком диапазоне показателя напряженного состояния ( $k_{\text{max}} = 0,58$ ;  $k_{\text{min}} = -3,6$ ), степени однородной деформации 65-75% и при заданном законе изменения скорости деформации ( $2 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1} \div 9 \cdot 10^1 \text{с}^{-1}$ ).

### **Глава 3. 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. Точная формулировка реологических уравнений, дающая возможность определения характеристик НДС конкретных металлов в условиях, близких к реальным – это важная область научного поиска, разработка которой дает определяющий вклад в решение задач о пластическом течении.

#### **3.1. Построение и анализ диаграмм сопротивления деформации сплавов ВТ6с, 1201 и ВТ16 в практически важном диапазоне термомеханических параметров пластической деформации**

Планом эксперимента для каждого сплава предусмотрено проведение 36 испытаний образцов на сжатие для построения диаграмм сопротивления деформации и 36 испытаний на растяжение, сжатие и кручение 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 в практически для всех основных процессов ОМД (см. табл. 2.1).

На рис. 3.1 представлены объёмные диаграммы сопротивления деформации сплава ВТ6с в границах температурно-скоростных условий имеющих место в реальных процессах ОМД. Диаграммы построены строго по результатам эксперимента на сжатие в условиях однородной деформации образца на протяжении всего процесса испытаний и с постоянной скоростью деформации.

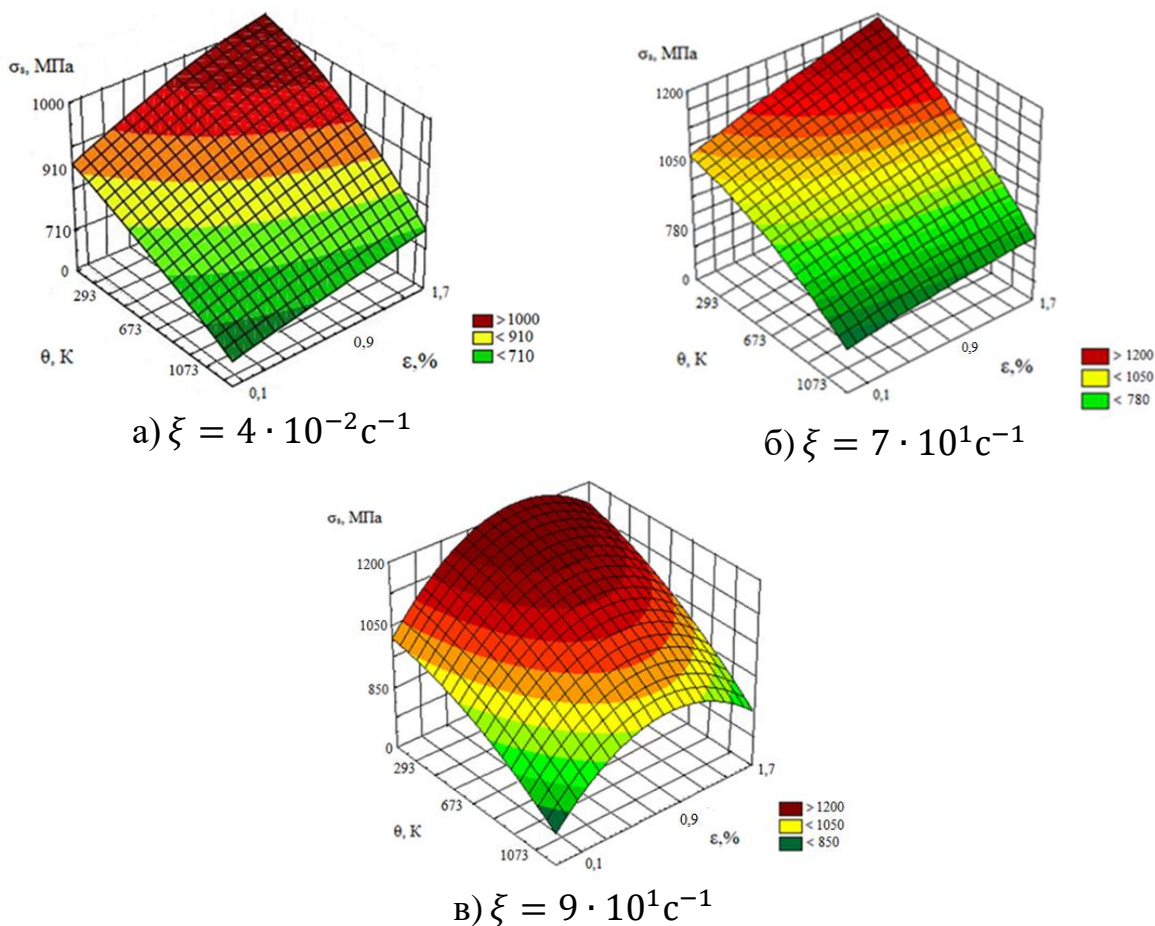


Рисунок 3.1 - Диаграммы сопротивления деформации сплава ВТ6с

Поверхности  $\sigma_s$  характеризуются умеренным упрочнением, причем имеет место отсутствие экстремума для диаграмм «а» и «б» и наличие  $\sigma_{max}$  для скорости деформации  $\xi = 9 \cdot 10^1 \text{c}^{-1}$ . Поверхность «в» характерна для динамического нагружения в условиях как холодной, так и горячей деформации, когда разрушение образца не происходит до окончания испытания. Аналогичный характер кривых сопротивления деформации встречается при проведении высокосортных испытаний сплавов хрома, никеля, бронз [3,50].

Поверхность «в» (рис. 3.1) после деформации 0,9 описывает процесс разупрочнения, характерный для динамического возврата, что присуще сплавам с высокой энергией упаковки. Динамический возврат интенсифицируется на снижающейся поверхности  $\sigma_s$  без установившиеся стадии и характерен для всего комплекса технологических параметров.

Поверхности  $\sigma_S$  для скоростей  $\xi = 4 \cdot 10^{-2} \text{c}^{-1}$  и  $\xi = 7 \cdot 10^1 \text{c}^{-1}$  (рис. 3.1, а, в) характеризуются положительной величиной коэффициента деформационного упрочнения до конца процесса осадки образца.

Поверхности  $\sigma_S$  сплава 1201 (рис. 3.2) для скоростей деформации  $\xi = 4 \cdot 10^{-2} \text{c}^{-1}$  «а» и  $\xi = 7 \cdot 10^1 \text{c}^{-1}$  «б» отличаются умеренным подъёмом сопротивления деформации во всем температурном диапазоне. Поверхности  $\sigma_S$  имеют незначительный коэффициент деформационного упрочнения (без локальных максимумов), а на заключительном этапе испытаний стремятся выйти на установившийся уровень. Такого рода поведения  $\sigma_S$  характерно для многих алюминиевых сплавов в условиях деформации при высоких температурах [51].

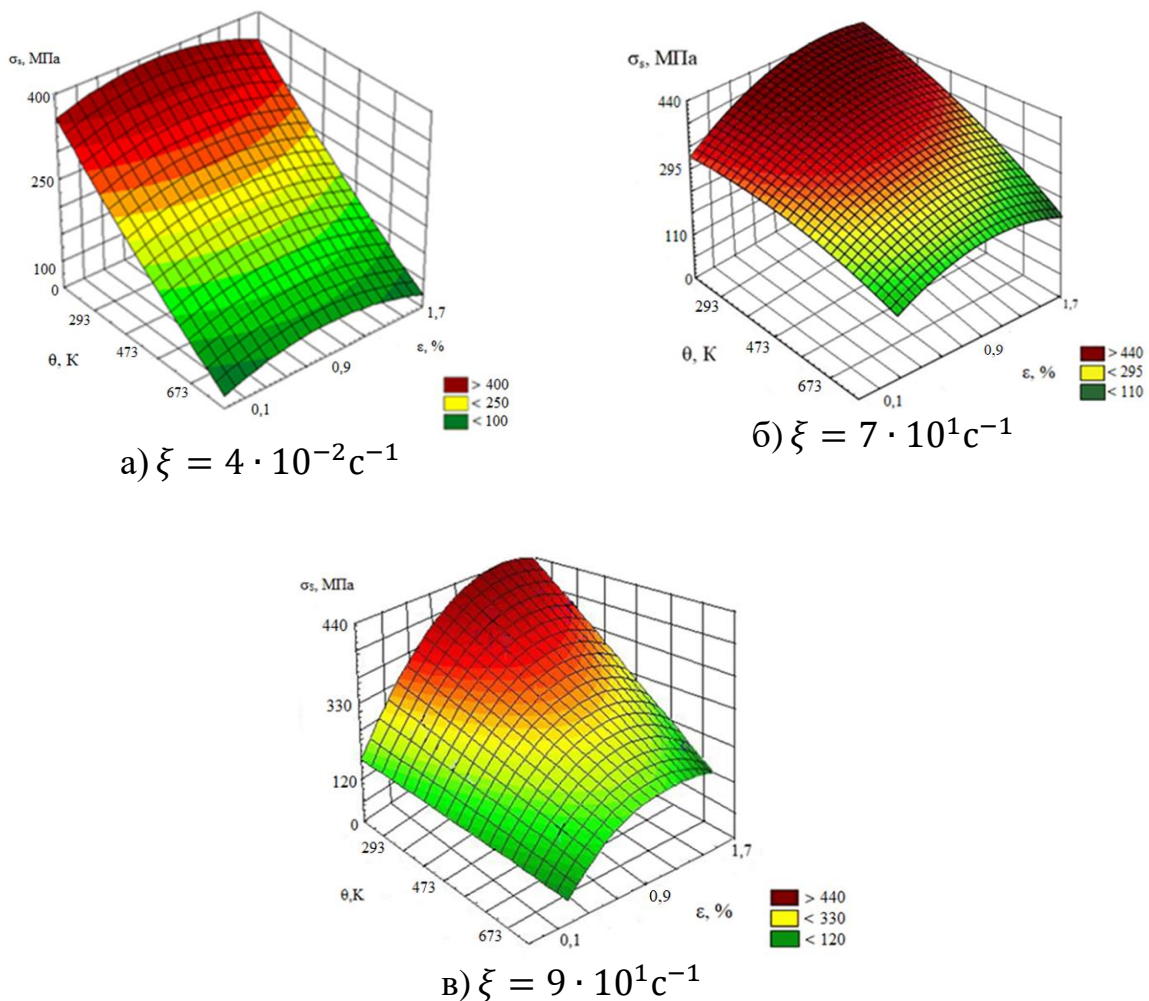


Рисунок 3.2 - Диаграммы сопротивления деформации сплава 1201



Поверхность  $\sigma_s$  (рис. 3.2, в) с повышением температуры испытаний стремится на завершающей стадии деформации к отрицательному деформационному упрочнению. Снижение сопротивления деформации при этом, происходит либо до постоянного значения  $\sigma_s$ , либо без такого.

И, наконец, поверхности  $\sigma_s$  сплава ВТ16 (рис. 3.3) отражают довольно редко встречающиеся свойство снижения сопротивления деформации с увеличением скорости деформации.

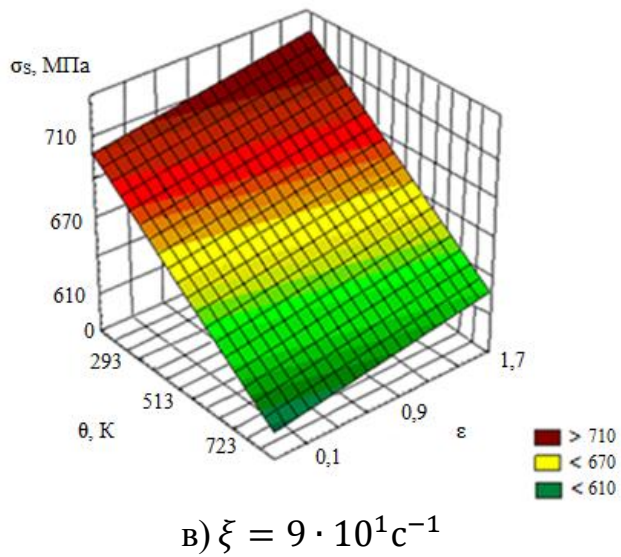
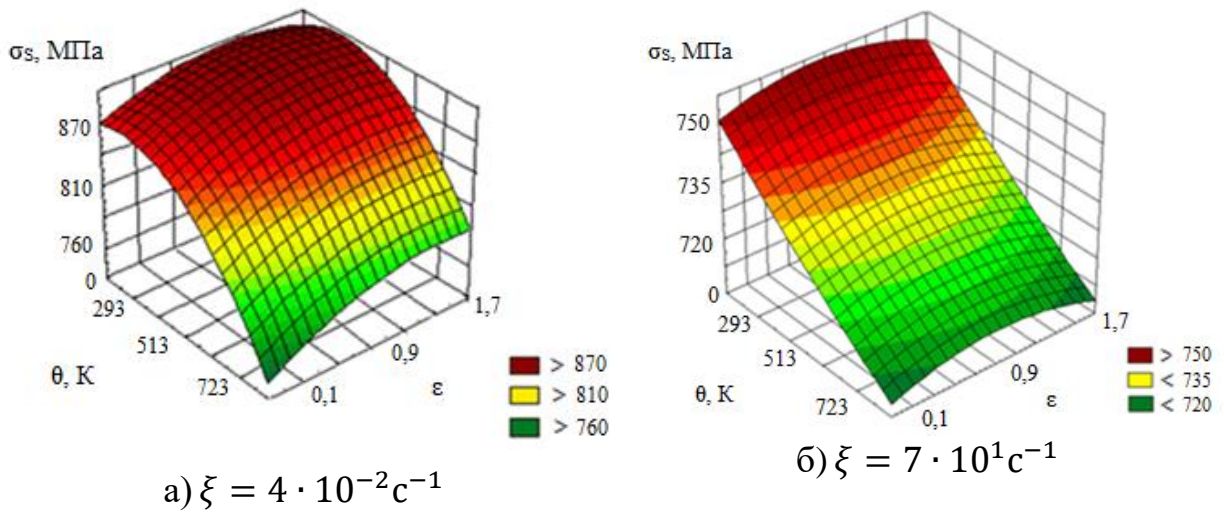


Рисунок 3.3- Диаграммы сопротивления деформации сплава ВТ16

Эта особенность сплава прослеживается для всех трех скоростей деформации. Подобное поведение характерно и для жаропрочных сплавов на

никелевой основе, типа ЖС6-КП [41]. Полученные сведения совпадают с данными, приведенными в работе [52].

### 3.2. Результаты экспериментального исследования предельной пластичности сплавов ВТ6с, 1201 и ВТ16

При изучении сложного влияния параметров деформации на пластичность исследуемых сплавов учитывали, прежде всего, зависимость пластичности от инвариантов тензора напряжений (3.1).

$$A_p = A_p \left( \varepsilon, \frac{\sigma}{T} \right) \quad (3.1)$$

В соответствии с Пи – теоремой, если уравнения связывают «m» размерных величин, из которых «n» величин имеют основную размерность, то эти уравнения могут быть приведены к новому виду, объединяющему «m-n» безразмерных параметров. В выражении (3.1)  $m = 2$ ;  $n = 1$ . Используя Пи - теорему, это выражение можно записать, добавив в него  $\theta$  и  $\xi$ , в виде [53]:

$$A_p = A_p \left( \frac{\sigma}{T}, \theta, \xi \right) \quad (3.2)$$

Теперь мы должны обобщить сведения о  $A_p$  для исследуемых сплавов в виде поверхностей пластичности или в виде реологических уравнений. Как было показано в главе 1, в литературе имеются определенные сведения о диаграммах пластичности для исследуемых сплавов. Однако, указанные зависимости изучены мало и диаграммы строятся, в основном, без учета температуры и скорости деформации.

В представленной работе поверхности пластичности 3.4 построены по результатам испытаний на растяжение, сжатие и кручение на ПВД. Для обработки результатов экспериментов использованы следующие формулы:

1. Растяжение образца без шейки (см. рис. 2.6):

$$A_p = 2\sqrt{3} \ln \frac{d_0}{d_r}; \frac{\sigma}{T} = 0,58; \quad (3.3)$$

2. Осадка образца без бочки (см. рис. 2.6): (3.4)

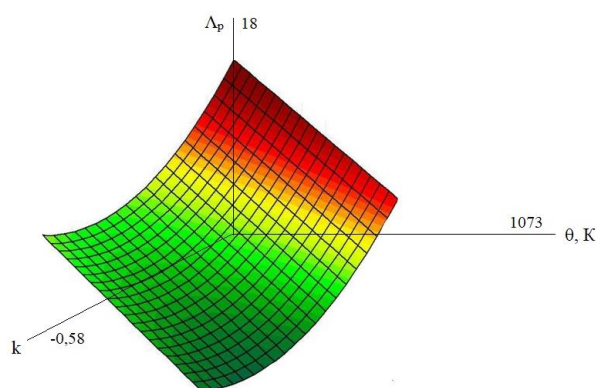
$$\Lambda_p = \sqrt{3} \ln \frac{h_0}{h_r}; \frac{\sigma}{T} = -0,58;$$

3. Кручение (см. рис. 2.6):

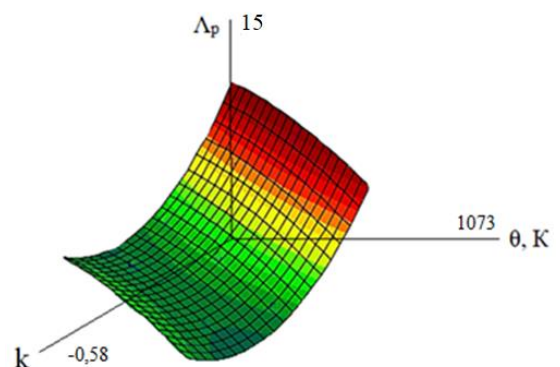
$$\Lambda_p = \operatorname{tg} \varphi; \frac{\sigma}{T} = 0.$$

(3.5)

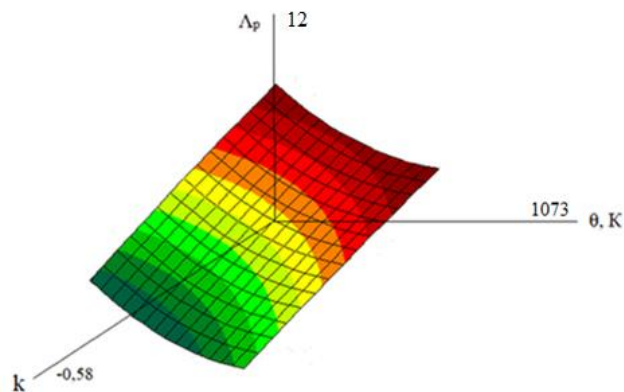
На рис. 3.4 представлены поверхности предельной пластичности сплава ВТ6с в границах температурно-скоростных условий, имеющих место в большинстве процессов ОМД.



а)  $\Lambda_{p \max} = 18$ ;  $\theta_{\min} = 293\text{K}$ ;  
 $\theta_{\max} = 1073\text{K}$ ;  $k = (-0,58 \div -3,6)$



б)  $\Lambda_{p \max} = 15$ ;  $\theta_{\min} = 293\text{K}$ ;  
 $\theta_{\max} = 1073\text{K}$ ;  $k = (-0,58 \div -3,6)$



в)  $\Lambda_{p \max} = 12$ ;  $\theta_{\min} = 293\text{K}$ ;  
 $\theta_{\max} = 1073\text{K}$ ;  $k = (-0,58 \div -3,6)$

Рисунок 3.4 - Диаграммы предельной пластичности сплава ВТ6с:

а -  $\xi = 4 \cdot 10^{-2} \text{c}^{-1}$ ; б -  $\xi = 7 \cdot 10^1 \text{c}^{-1}$ ; в -  $\xi = 9 \cdot 10^1 \text{c}^{-1}$

Поверхности характеризуются интенсивным ростом пластичности с уменьшением показателя напряженного состояния после значения  $-0,58$  (сжатие без приложения гидростатического давления) для всех представленных скоростей деформации. Это справедливо как для холодной, так и для горячей деформации.

Аналогичный характер роста пластичности прослеживается и для сплава 1201 (рис. 3.5).

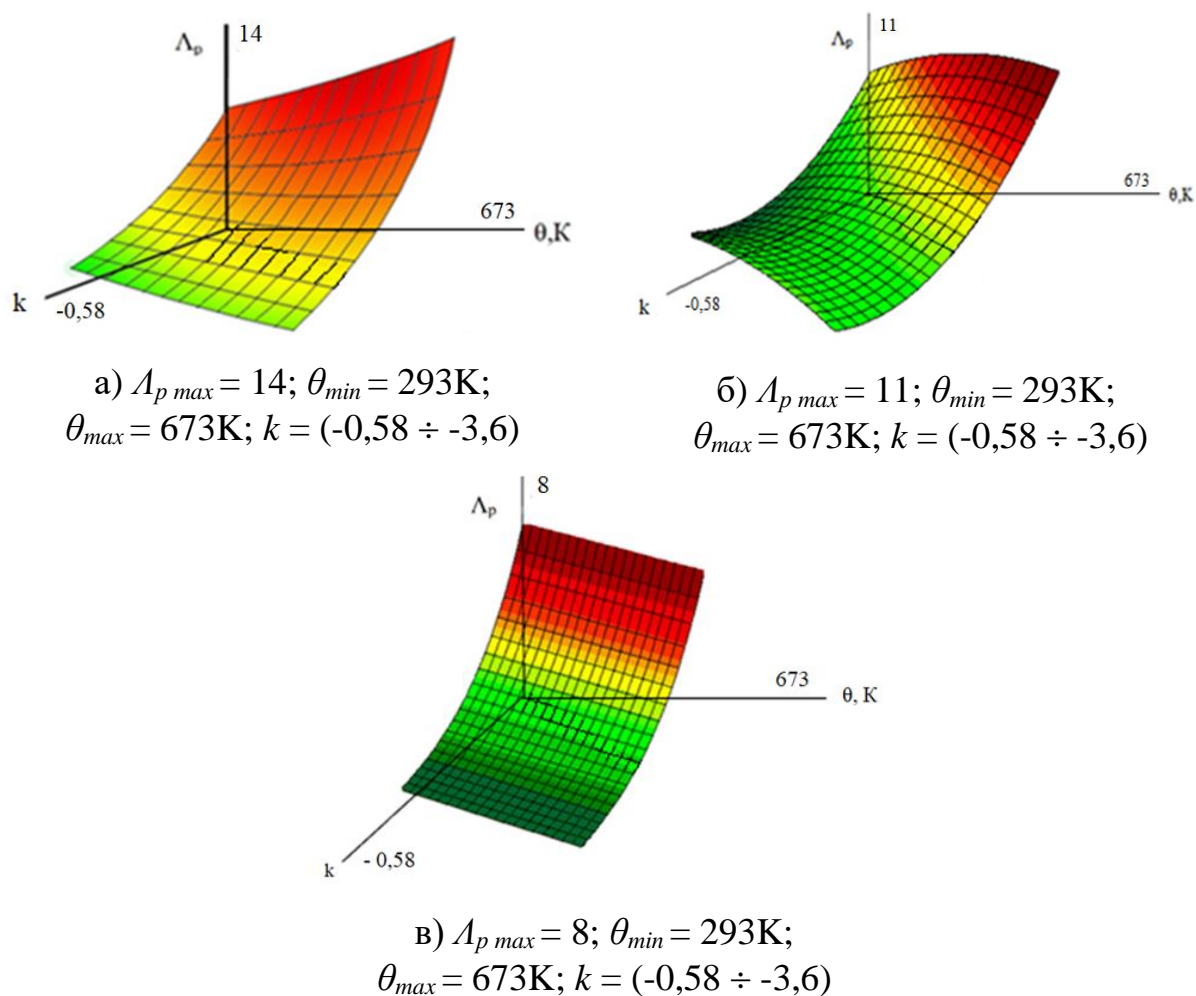
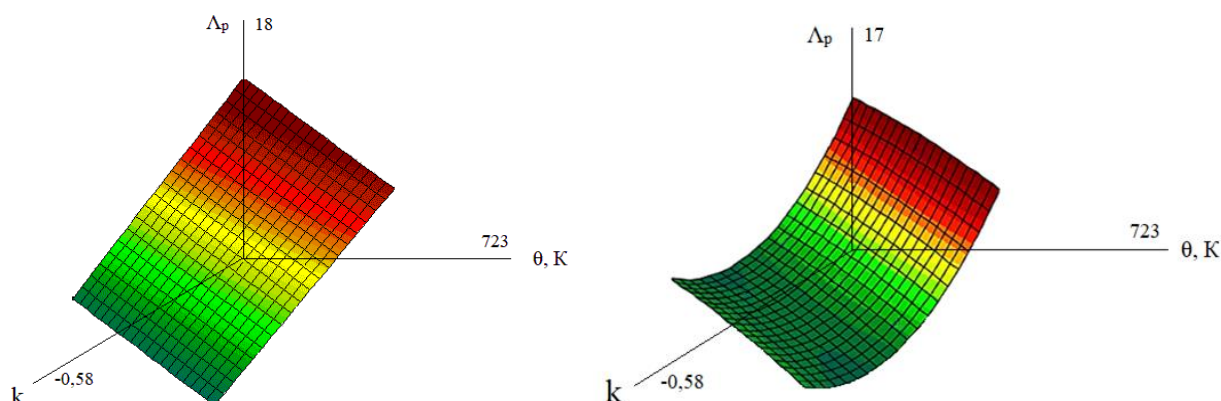


Рисунок 3.5 - Диаграммы предельной пластичности сплава 1201:

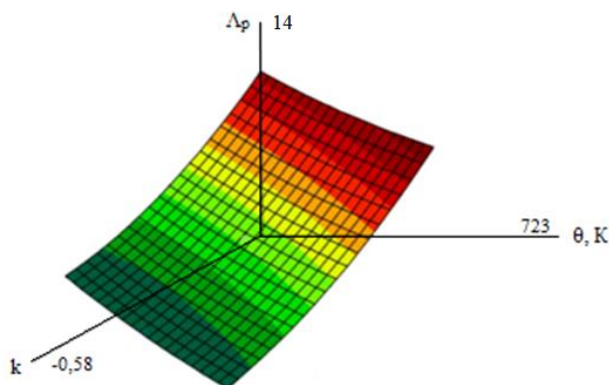
а -  $\xi = 4 \cdot 10^{-2} \text{c}^{-1}$  ; б -  $\xi = 7 \cdot 10^1 \text{c}^{-1}$  ; в -  $\xi = 9 \cdot 10^1 \text{c}^{-1}$

Поверхности пластичности сплава ВТ16 отражают типовой характер роста  $A_p$  с увеличением температуры и достигают высоких значений практически для всех исследованных скоростей деформаций (рис. 3.6).



а)  $A_{p \max} = 18$ ;  $\theta_{\min} = 293\text{K}$ ;  
 $\theta_{\max} = 723\text{K}$ ;  $k = (-0,58 \div -3,6)$

б)  $A_{p \max} = 17$ ;  $\theta_{\min} = 293\text{K}$ ;  
 $\theta_{\max} = 723\text{K}$ ;  $k = (-0,58 \div -3,6)$



в)  $A_{p \max} = 14$ ;  $\theta_{\min} = 293\text{K}$ ;  
 $\theta_{\max} = 723\text{K}$ ;  $k = (-0,58 \div -3,6)$

Рисунок 3.6 - Диаграммы предельной пластичности сплава ВТ16:

а -  $\xi = 4 \cdot 10^{-2} \text{c}^{-1}$ ; б -  $\xi = 7 \cdot 10^1 \text{c}^{-1}$ ; в -  $\xi = 9 \cdot 10^1 \text{c}^{-1}$

Вероятно, существуют такие напряженные состояния, при которых пластичность исследованных сплавов становится особо большой. В наших исследованиях показатель напряженного состояния ограничен значением -3,6, имеющим место в очаге деформации металлов для подавляющего большинства процессов ОМД. «к» может быть увеличен для процессов гидропрессования с большими коэффициентами вытяжки и для гидропрессования с противодавлением.

### **3.3. Аппроксимация экспериментальных данных реологическими уравнениями и создание алгоритма испытаний и количественной оценки их результатов**

В практической инженерной деятельности редко используются научные результаты полученные в виде графиков и таблиц. Практические всегда необходимо представление первичных сведений (результатов экспериментов) в виде соответствующих уравнений, которые фактически, одни математические объекты заменяют другими – более простыми и удобными для конкретных технологических расчетов. Такая замена называется *аппроксимация*.

При статистической обработке данных эксперимента возникают определенные трудности, касающихся вопросов сглаживания и устранения непредвиденных ошибок. Вот почему при аппроксимации кривых сопротивления деформации для определения вида функций необходимо соблюдать требования касающиеся гладкости самих функций и их первых производных. Дело в том, что объёмные диаграммы сопротивления деформации и пластичности весьма разнообразны по формам, поэтому при аппроксимации необходимо использовать разные функции.

Для построения объёмных диаграмм использована программа обработки данных Statistica. Эта универсальная интегрированная система, предназначенная для статистического анализа, визуализации данных и разработки пользовательских приложений. Программа содержит полный набор классических методов анализа данных, общие статистические и графические средства, а также специальные модули. Трёхмерный визуальный анализ позволяет наглядно представить данные в трёхмерном пространстве для одной или нескольких переменных. С помощью трёхмерного визуального анализа можно обнаружить сложные нелинейные взаимосвязи между переменными [54]. Применение программы подразумевало статистическую обработку экспериментальных данных, построение

аппроксимирующей зависимости по виду заданной функции и расчёт коэффициентов аппроксимации с заданным уровнем точности.

Поверхности  $\sigma_s = \sigma_s(\theta, \varepsilon, \xi)$  удовлетворительно аппроксимируются выражением:

$$\sigma_s = a_5 \frac{\varepsilon^{a_2} \times \xi^{a_3}}{\sqrt{3}} \exp[a_4(a_1\theta + a_6)] \quad (3.6)$$

После проведения экспериментов по определению сопротивления деформации сплавов ВТ6с, 1201, ВТ16 были определены соответствующие значения коэффициентов уравнения 3.6 по данным объемных диаграмм, представленных в табл. 3.1.

Таблица 3.1 - Результаты экспериментального исследования  
(Коэффициенты реологического уравнения 3.6)

Сплав	$\xi$	$\varepsilon$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$
ВТ6с	$4 \cdot 10^{-2}$	0,1 (10)	168,01	$34 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$163 \cdot 10^{-7}$	996,854	195,413
		0,9 (50)	39,81	$6 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$162 \cdot 10^{-7}$	1341,56	101,05
		1,7 (75)	576,01	$2 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$281 \cdot 10^{-8}$	221,02	601,91
	$7 \cdot 10^{-1}$	0,1 (10)	112,52	$31 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$174 \cdot 10^{-7}$	899,997	191,013
		0,9 (50)	4,62	$2 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$149 \cdot 10^{-7}$	1288,44	92,01
		1,7 (75)	501,41	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$259 \cdot 10^{-8}$	331,001	935,40
	$9 \cdot 10^{-1}$	0,1 (10)	122,72	$43 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$163 \cdot 10^{-7}$	779,856	201,048
		0,9 (50)	47,19	$1 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$158 \cdot 10^{-7}$	740,77	91,05
		1,7 (75)	516,61	$12 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$216 \cdot 10^{-8}$	425,008	961,49
1201	$4 \cdot 10^{-2}$	0,1 (10)	50,101	0,5	0,17	$51 \cdot 10^{-7}$	50,31	10,15
		0,9 (50)	58,01	$5 \cdot 10^{-3}$	$11 \cdot 10^{-3}$	$55 \cdot 10^{-7}$	75,12	7,232
		1,7 (75)	61,31	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$48 \cdot 10^{-7}$	17,01	1,025
	$7 \cdot 10^{-1}$	0,1 (10)	91,92	0,1	0,12	$44 \cdot 10^{-7}$	111,02	30,112
		0,9 (50)	78,16	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$44 \cdot 10^{-7}$	89,02	5,112
		1,7 (75)	63,41	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$51 \cdot 10^{-7}$	16,02	2,045
	$9 \cdot 10^{-1}$	0,1 (10)	37,27	0,3	0,17	$62 \cdot 10^{-7}$	94,14	34,132
		0,9 (50)	70,01	$6 \cdot 10^{-3}$	0,12	$52 \cdot 10^{-7}$	60,02	6,213
		1,7 (75)	26,34	$6 \cdot 10^{-3}$	0,12	$62 \cdot 10^{-7}$	32,14	3,059

ВТ16	$4 \cdot 10^{-2}$	0,1 (10)	39,11	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$212 \cdot 10^{-7}$	776,11	369,54
		0,9 (50)	65,10	$9 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$241 \cdot 10^{-8}$	606,61	40,101
		1,7 (75)	118,01	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$324 \cdot 10^{-8}$	586,51	101,01
	$7 \cdot 10^{-1}$	0,1 (10)	21,01	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$259 \cdot 10^{-7}$	899,01	349,54
		0,9 (50)	75,11	$7 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$287 \cdot 10^{-7}$	780,01	91,165
		1,7 (75)	218,01	$9 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$365 \cdot 10^{-8}$	340,01	201,01
	$9 \cdot 10^{-1}$	0,1 (10)	28,51	0,14	0,17	$268 \cdot 10^{-7}$	448,52	369,84
		0,9 (50)	77,31	0,11	0,2	$299 \cdot 10^{-8}$	363,11	96,195
		1,7 (75)	128,46	0,03	$8 \cdot 10^{-3}$	$373 \cdot 10^{-8}$	585,43	231,71

Для построения поверхности пластичности  $\Lambda_p = \Lambda_p(\theta, \xi, k)$  осуществляли испытания на растяжение, сжатие и кручение ( $k = -0,58 \div -3,6$ ) при гидростатическом давлении. Поверхности, построенные по результатам испытаний, позволяют констатировать тот факт, что с переходом  $k$  в область отрицательных значений, пластичность исследованных сплавов непрерывно повышается.

Поверхности  $\Lambda_p = \Lambda_p(\theta, \xi, k)$  удовлетворительно аппроксимируются выражением:

$$\Lambda_p = [y_{\varepsilon 2} - (y_{\varepsilon 1} - y_{\varepsilon 2})\xi] \exp\{[\varphi_{\varepsilon 2} - (\varphi_{\varepsilon 1} - \varphi_{\varepsilon 2})\xi]k\} \exp\left[\gamma_{\varepsilon} \left(\frac{\theta_{min}}{\theta_{max}}\right)^{\delta_{\varepsilon}}\right] \quad (3.7)$$

После проведения экспериментов по определению предельной пластичности сплавов ВТ6с, 1201, ВТ16 были определены соответствующие значения коэффициентов уравнения 3.7 для построения объёмных диаграмм, представленных в табл. 3.2.



Таблица 3.2 - Результаты экспериментального исследования

(Коэффициенты реологического уравнения 3.7)

Сплав	$\xi$	k	$Y_{\sigma 1}$	$Y_{\sigma 2}$	$\Phi_{\sigma 1}$	$\Phi_{\sigma 2}$	$\gamma_{\sigma}$	$\delta_{\sigma}$
ВТ6с	$4 \cdot 10^{-2}$	- 3,6	53,37	27,16	0,32	0,37	0,88	$12 \cdot 10^{-3}$
		- 2,6	33,04	24,18	0,18	0,26	0,36	$15 \cdot 10^{-3}$
		- 1,6	13,62	19,15	0,25	0,12	0,12	$9 \cdot 10^{-3}$
	$7 \cdot 10^{-1}$	- 3,6	73,67	87,12	0,32	0,47	35,54	$9 \cdot 10^{-4}$
		- 2,6	43,04	54,18	0,38	0,56	30,53	$1 \cdot 10^{-3}$
		- 1,6	23,04	34,15	0,27	0,76	54,18	$3 \cdot 10^{-3}$
	$9 \cdot 10^{-1}$	- 3,6	11,01	10,90	$45 \cdot 10^{-3}$	$37 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$15 \cdot 10^{-3}$
		- 2,6	12,24	134,18	$20 \cdot 10^{-3}$	$49 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$11 \cdot 10^{-3}$
		- 1,6	4,54	78,41	$36 \cdot 10^{-3}$	$79 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$
1201	$4 \cdot 10^{-2}$	- 3,6	71,54	32,01	0,46	0,58	1,19	$5 \cdot 10^{-4}$
		- 2,6	61,54	38,11	0,33	0,41	0,04	$8 \cdot 10^{-4}$
		- 1,6	89,43	26,05	0,39	0,32	0,01	$1 \cdot 10^{-4}$
	$7 \cdot 10^{-1}$	- 3,6	71,54	76,12	0,41	0,53	28,49	$45 \cdot 10^{-3}$
		- 2,6	61,54	68,14	0,37	0,49	19,23	$5 \cdot 10^{-4}$
		- 1,6	58,43	61,05	0,33	0,41	6,53	$1 \cdot 10^{-4}$
	$9 \cdot 10^{-1}$	- 3,6	15,01	16,126	$5 \cdot 10^{-4}$	$14 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-4}$
		- 2,6	1,46	261,87	$11 \cdot 10^{-3}$	$45 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$
		- 1,6	6,43	83,05	$25 \cdot 10^{-3}$	$71 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$
ВТ16	$4 \cdot 10^{-2}$	- 3,6	36,51	38,11	0,49	0,51	3,63	$4 \cdot 10^{-3}$
		- 2,6	20,52	21,65	0,47	0,63	29,09	$2 \cdot 10^{-3}$
		- 1,6	8,21	12,14	0,49	0,63	22,51	$9 \cdot 10^{-3}$
	$7 \cdot 10^{-1}$	- 3,6	35,57	42,17	0,47	0,49	2,11	$4 \cdot 10^{-3}$
		- 2,6	11,11	21,34	0,45	0,59	24,65	$9 \cdot 10^{-3}$
		- 1,6	9,21	11,34	0,44	0,67	25,27	$3 \cdot 10^{-3}$
	$9 \cdot 10^{-1}$	- 3,6	35,43	35,47	$53 \cdot 10^{-3}$	$44 \cdot 10^{-3}$	0,04	$8 \cdot 10^{-3}$
		- 2,6	14,16	16,17	$56 \cdot 10^{-3}$	$71 \cdot 10^{-3}$	0,11	$12 \cdot 10^{-2}$
		- 1,6	9,21	1,33	$61 \cdot 10^{-3}$	$77 \cdot 10^{-3}$	0,21	$16 \cdot 10^{-2}$

Аппроксимирующие зависимости 3.6 и 3.7 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 %.

### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Впервые проведены комплексные исследования, построены объемные диаграммы и получены реологические уравнения в рамках технологических параметров деформаций, имеющих место в реальных процессах ОМД для сплавов ВТ6с, 1201 и ВТ16.

2. Установлено, 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 ( $k = -0,58 \div -3,6$ ).

3. Установлены закономерности взаимосвязи сопротивления деформации и пластичности сплавов ВТ6с, 1201 и ВТ16 с температурой (293 ÷ 1073 К; 293 ÷ 673 К; 293 ÷ 723 К), скоростью деформации (от  $4 \cdot 10^{-2} \text{с}^{-1}$  и до  $9 \cdot 10^1 \text{с}^{-1}$ ), степенью деформации (65 ÷ 75%) и показателем напряженного состояния (0,58 ÷ -3,6). На основе классификации поверхностей сопротивления деформации и аппроксимации экспериментальных данных предложены реологические уравнения: для  $\sigma_s = \sigma_s(\theta, \varepsilon, \xi)$  и  $A_p = A_p(\theta, \xi, k)$ .

## **Глава 4. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПРОВЕРКА, КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО РАСЧЕТНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ РЕЖИМАМ**

В данной заключительной главе рассмотрены итоги реализации результатов исследований в промышленности и технико-экономическая эффективность разработок.

На основе анализа реологических уравнений для компонент соединения ВТ6с÷1201 установлены температурно-скоростные параметры деформации и разработан технологический процесс изготовления биметаллических труб включающий сборку, градиентный нагрев биметаллической заготовки и горячее гидропрессование. Приведены показатели качества изготовленных труб.

На основе новых сведений о сопротивлении деформации и пластичности сплава ВТ16, установленных с применением пластометров высокого давления, усовершенствована технология холодной прокатки прутков для изготовления деталей крепления конструкций летательных аппаратов.

Изделия, определены исходя из потребностей производства:

- биметаллические трубы диаметром:  $D_{\text{нар}} = 25 \div 28$  мм;  $d_{\text{ном}} = 17 \div 19$  мм;  $D_{\text{отв}} = 10$  мм из композиции ВТ6с ÷ 1201;
- прутки из титанового сплава ВТ16 диаметром  $10 \div 20,8$  мм для изготовления гаек размером «под ключ» S 8; 10; 13; 17; 19.

### **4.1. Опытно-промышленная проверка и результаты внедрения работы**

В соответствии с договором «Установление закономерностей взаимосвязи сопротивления деформации металлов с температурой, степенью и скоростью деформации и разработка на основе исследований новых технологических процессов пластической деформации» между предприятием ООО «Мегаметалл» и МАИ, металлургическая компания обратилась с предложением провести опытно-промышленное опробование в котором

предусмотрена возможность изготовления, впервые, биметаллических труб ВТ6с÷1201 для переходных элементов соединений деталей и узлов из разнородных металлов и усовершенствование технологии холодной прокатки шестигранных прутков из титанового сплава ВТ16 для изготовления деталей крепления конструкций летательных аппаратов с целью определения конкурентных преимуществ новых изделий и новых технологий.

При этом заказчиком и исполнителем работы осуществлена предварительная техническая экспертиза, включающая:

- техническую оценку состояния промышленного оборудования и технологий установленных по результатам выполнений НИР;
- анализ существующих аналогичных по тематике технологий и оборудования, сравнительная оценка с другими производителями;
- оценку преимуществ и новизны предлагаемого продукта;
- оценку готовности технологической документации и средств технологического оснащения к проведению работ;
- оценку программ и методик испытаний, методических документов, технологических рекомендаций по предлагаемым технологиям, отчетов по патентным исследованиям и публикациям;
- проверку разрешительной документации на предмет применения технологий и оборудования на территории РФ, соответствие их правилам, нормам промышленной безопасности и ГОСТам;
- изучение технической документации (инструкций, технических условий документов по эксплуатации оборудования и т.п.);
- анализ результатов возможного внедрения новых технологий;
- предварительную оценку экономической эффективности по результатам технического аудита, который подтвердил экономические критерии, действующие на предприятии.

На основе результатов предварительной экспертизы проведено техническое совещание с изготовителем и принято решение о проведении промышленного опробования результатов НИР.

#### 4.2. Разработка технологии изготовления биметаллических труб ВТбс÷1201 для переходных элементов соединений деталей и узлов из разнородных металлов

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 изготовить из биметаллических труб (рис. 4.1).

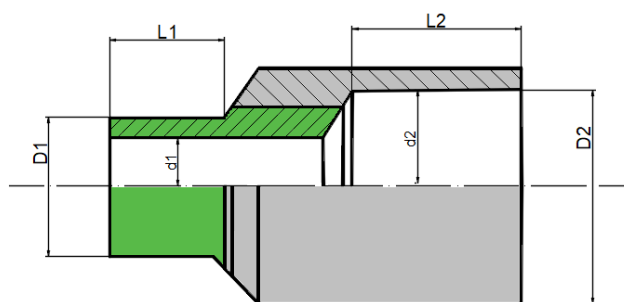


Рисунок 4.1 - Переходник (буквами с индексами указаны характерные размеры, цветом выделены разнородные металлы)

Известно, что в процессе совместной пластической деформации разнородных металлов имеет место неравномерность распределения послойных деформаций компонент из-за различия прочностных свойств металлов, входящих в исходную заготовку. Результаты исследований отечественных ученых позволили установить, что совместная пластическая деформация разнородных металлов возможна, если их сопротивление деформации различается не более чем в 3-3,5 раза [10].

Таким образом, основной задачей при разработке технологии изготовления изделий из разнородных металлов методами ОМД является обеспечение таких параметров пластической деформации, которые будут приемлемы для каждого из совместно деформируемых металлов [11].

Этого можно достичь только имея сведения о реологии деформируемых металлов. Исследование предельной пластичности и сопротивления

деформации сплавов ВТ6с и 1201, проведены на ПВД (см. глава 2, рис. 2.1 – 2.3) позволили впервые установить реологические уравнения для всей области температурно-скоростных условий деформации каждого сплава (см. глава 3, уравнения 3.6 и 3.7).

На основе анализа реологических уравнений установлены температурно-скоростные условия совместной пластической деформации композиции ВТ6с÷1201. Технологические параметры горячего гидропрессования, приведённые в табл. 4.1 рассчитаны по методике изложенной в работе [41].

Таблица 4.1 - Технологические параметры горячего гидропрессования биметаллических труб ВТ6с÷1201

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

Значительное влияние на качество соединения оказывает подготовка компонент и сборка биметаллической заготовки (рис. 4.2). Перед сборкой поверхности контакта компонент (из-под резца) обезжиривали промывкой в четырёххлористом углероде (ГОСТ 20288-74), затем в этиловом спирте (ГОСТ Р 55878-2013).

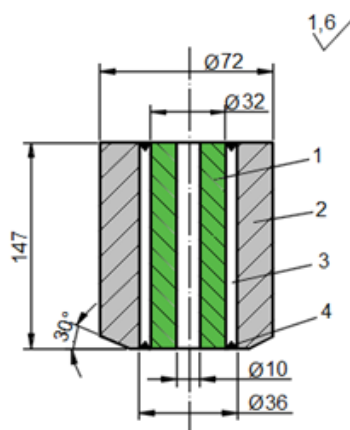


Рисунок 4.2 - Конструкция биметаллической заготовки: 1 – внутренняя трубная заготовка (ВТбс); 2 – внешняя трубная заготовки (1201); 3 – вакуумирований зазор; 4 – герметизирующие и токоизолирующие кольцевые клинья

Поверхности контакта между внутренней 1 и внешней 2 трубной заготовки разделяли вакуумированным зазором 3. Вакуумирование зазора осуществляли с помощью кольцевых токоизолирующих клиньев изготовленных из смеси порошка дисульфида молибдена с кремнийорганической смолой К-55 (ГОСТ 2082.3-81). Клинья запрессовывали в зазор между внутренней и внешней трубной заготовки на сварочной диффузионной вакуумной установке А306-06, обеспечивающей глубину вакуума на уровне от 0,013 до 0,026 Па. Величину зазора рассчитывали по формуле [55]:

$$\Delta = \left\{ \frac{D_{\text{НОМ}} [1 + \alpha_1 (\theta_1 - 293)]}{[1 + \alpha_2 (\theta_2 - 293)]} \right\} - 1$$

Нагрев заготовок перед горячей деформацией осуществляли на установке электроконтактного нагрева типа 2921 мощностью 500 кВт (рис. 4.3).

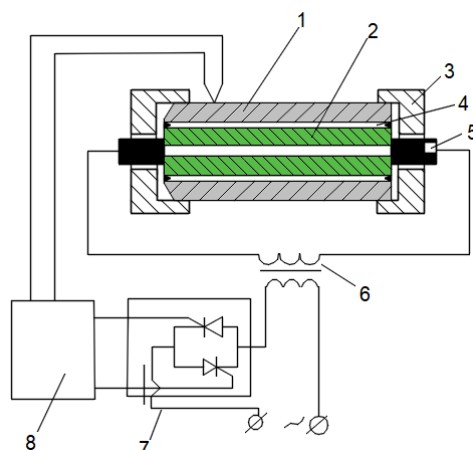


Рисунок 4.3 - Схема градиентного нагрева биметаллической заготовки электроконтактным способом: 1 – 1201; 2 – ВТ6с; 3 – фиксаторы; 4 – вакуумированный зазор между компонентами; 5 – система токоподвода; 6 – силовой трансформатор; 7 – блок тиристоров; 8 – блок управления

Собранную заготовку устанавливали в фиксаторах 3, подключали систему токоподвода 5 к внутренней трубной заготовке 2. От силового трансформатора 6 ток  $I_1$  (от 1297 до 1316 А) через систему токоподвода к внутренней трубной заготовке 2. Силовой трансформатор, имея несколько ступеней регулировки, позволяет изменять силу тока  $I_2$  во вторичной цепи (в заготовке) от 31 до 125 А.

Характеристики установки для нагрева заготовок представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2 - Основные характеристики установки типа 2921

Параметр	Значение
Поперечные размеры заготовок, мм	до Ø 98
Длина нагревательной зоны, мм	100 ÷ 1500
Напряжение, В	380
Мощность, кВт	500
Усилие контактного зажима, Н	13,5
Высота нагревательной позиции от пола, мм	1070
Габаритные размеры (высота x ширина x длина), мм	2200 x 2680 x 3110
Масса установки, т	11

В процессе нагрева производили регистрацию температуры по сечению заготовки. Для этого использовали вольфрам-рениевые термпары ВР5/20



(ГОСТ Р 8.585-2001) и хромель-алюмелевые термопары диаметром  $2 \cdot 10^{-4}$  м (ГОСТ Р 8.585-2001). Термопары припаивали в 4-х точках по сечению заготовки.

Для достижения расчетных значений температурного профиля заготовки применяли ступенчатый нагрев. Металл внутренней компоненты заготовки (ВТ6с) нагревали до температуры 973 - 1073 К в течении 480 с, причем температура внешней компоненты заготовки (1201) не превысила 383 - 413 К через 12 с после окончания нагрева. В результате был обеспечен оптимальный градиент температуры по сечению для различных типоразмеров заготовок (рис. 4.4).

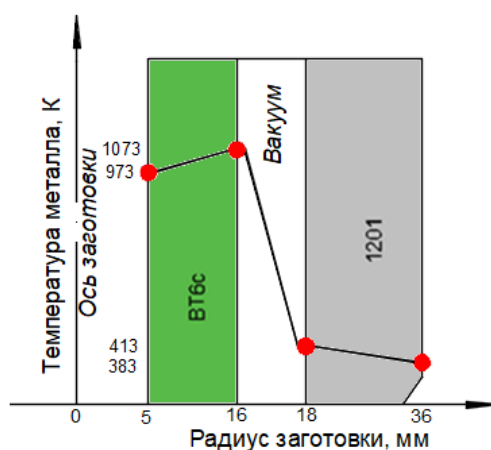


Рисунок 4.4 - Температурный профиль заготовки через 12 с после окончания нагрева (время транспортировки от нагревателя к прессу)

Градиентный нагрев биметаллической заготовки с вакуумированным зазором между токоизолированными компонентами позволяет обеспечить к началу процесса горячего гидропрессования допустимое соотношение между сопротивлением деформации компонент  $\frac{\sigma_{S_{ВТ6с}}}{\sigma_{S_{1201}}} = 2,1 \div 3,4$ .

После нагрева биметаллическую заготовку помещали в технологическую оболочку выполненную из графита - ГТ-1 (ГОСТ 4596-75) и загружали в контейнер. Горячее гидропрессование осуществляли на вертикальном гидравлическом прессе НР 630 усилием 6,3 МН со скоростью прессования 15 – 25 мм/с.

Характеристики гидравлического пресса НР 630 представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3 - Основные технические характеристики пресса

Параметр	Значение
Усилие, т	630
Размер ползуна, мм	1800 x 1100
Скорость ползуна прессования, мм/с	15 - 25
Масса установки, т	26

В процессе гидропрессования технологическая оболочка 2 обеспечивает схему гидростатического выдавливания, т.е. ведет себя при высоком давлении и температуре подобно вязкой жидкости. В пуансоне 6 закреплена игла 3, имеющая небольшую конусность, благодаря которой в момент завершения процесса изделие свободно отделяется от иглы, а пресс-остаток не образуется. Для горячего гидропрессования применяли радиальную матрицу 5 и контейнер 1 из стали 3Х2В8, термически обработанные на твердость HRC 42-52. Диаметр контейнера 104 мм, диаметр иглы и канала матрицы определяется требованиями к типоразмерам биметаллических труб (рис. 4.5).

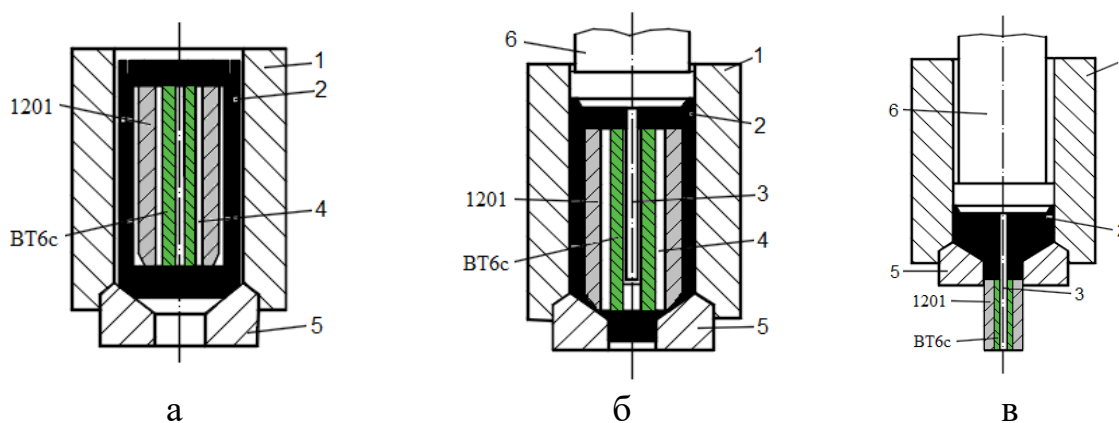


Рисунок 4.5 - Схема горячего гидропрессования биметаллических труб (а.с. 617097): а – нагретая заготовка в контейнере пресса; б – начало процесса; в – завершение процесса; 1 – контейнер; 2 – технологическая оболочка; 3 – игла; 4 – вакуумированный зазор между компонентами; 5 – матрица; 6 - пуансон

Процесс гидропрессования осуществляют следующим образом. В момент входа пуансона 6 с иглой 3 в контейнер 1 давление головки через технологическую оболочку 2 передается на торец заготовки, и последняя, разрушив дно оболочки, перекрывает матрицу 5. Создается контакт заготовки с матрицей, препятствующий истечению стеклографитовой среды оболочки наружу.

Образовавшийся после разрушения оболочки стеклографитовый порошок заполняет все пространство вокруг заготовки. Нижний конец иглы при этом не доходит до дна заготовки. Зазор между пуансоном и контейнером достаточно мал, чтобы создать значительное гидравлическое сопротивление для предотвращения вытекания графита. По мере повышения давления стеклографитовая среда уплотняется настолько, что обеспечивает равномерное распределение давления по всей поверхности заготовки. Процесс пластической деформации начинается с увеличением давления, причем в начальный момент из матрицы выходит передний конец трубы в виде пробки, а когда игла опустится настолько, что перекроет матрицу, начнется истечение трубы.

Следует отметить, что часть заготовки, находящаяся в контейнере (в отличие от обычного прессования), сохраняет свою форму в течение всего процесса. По мере выдавливания заготовки увеличивается расстояние между штемпельной головкой и заготовкой.

В результате горячего гидропрессования изготовлены биметаллические трубы без нарушения сплошности длиной - 997 мм (после обрезки концов для испытаний) с чистой и гладкой поверхностью, характерной для изделий после гидропрессования и минимальной неравномерностью распределения слоев (рис. 4.6).



Рисунок 4.6 - Отрезок биметаллической трубы (а) и переходник (б)

Следует отметить, что установленные в работе параметры совместного пластического течения сплавов ВТ6с и 1201 позволили обеспечить устойчивое квазиламинарное течение слоев компонент только благодаря преимуществам гидропрессования [56], а именно – отсутствию распрессовки в контейнере сложной градиентно-нагретой биметаллической заготовки с токоизолированным вакуумированным зазором между компонентами и активному гидродинамическому трению на всей границе инструмент-заготовка. Пластичность компонент достигается благодаря высоким отрицательным значениям показателя напряженного состояния в очаге деформации (см. рис. 3.4, б; 3.5, б).

Анализ микроструктуры зоны соединения на трех участках после горячей деформации оценивали с помощью оптического микроскопа DSX1000 с использованием специального цифрового объектива «UIS2» (рис. 4.7).

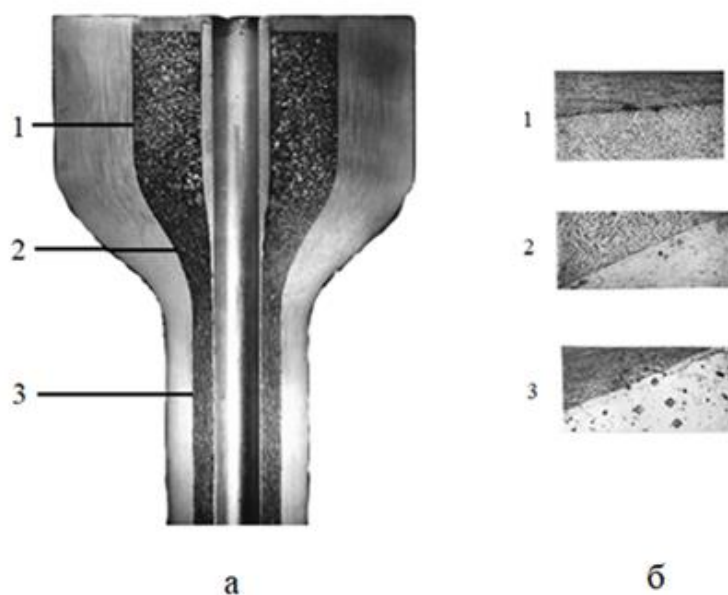


Рисунок 4.7 - Макроструктура пресс-остатка (а) и микроструктура зоны соединения слоев в контрольных точках (х340) (б): 1 – до входа в очаг деформации; 2 – в очаге деформации; 3 – в готовом изделии

Исследование макроструктуры ВТ6с и 1201 позволило установить, что на всем участке пресс-остатка она однородная у обоих сплавов, размер макрозерна соответствует 2 - 4 баллам (ВТ6с) и 1 баллу (1201). Каких-либо дефектов металлургического и технологического происхождения в сечениях заготовки не обнаружено.

Анализ микроструктуры зоны соединения на трех участках после горячей деформации показал, что зона соединения слоев имеет ровные четкие очертания, без резких искривлений в пределах всего сечения образца. Микропор в зоне соединения не выявлено.

Оценку величины зерна проводили с помощью программы ImageJ по методу подсчета количества зерен с определением среднего диаметра зерна в соответствии с ГОСТ 5639082:

$$d = \frac{1}{\sqrt{m}}$$

Переходя от микроструктуры зоны соединения к его макросвойствам, прежде всего оценили прочность соединения по результатам механических испытаний на растяжение на установке УНИС-1000 и ударный изгиб на маятниковом копре КММ-5 при комнатной температуре (рис. 4.8, 4.9). Зону соединения слоев располагали в центральной части испытываемого образца поперёк оси растяжения.

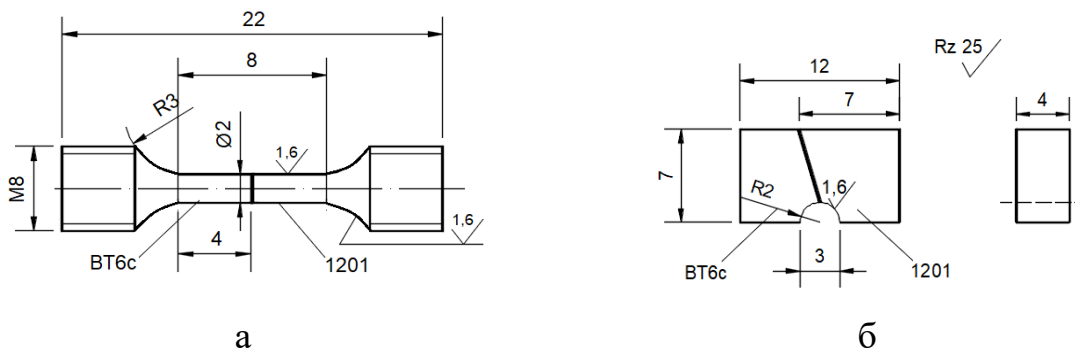


Рисунок 4.8 - Форма и размеры образцов для испытаний:

а) на растяжение; б) на ударный изгиб

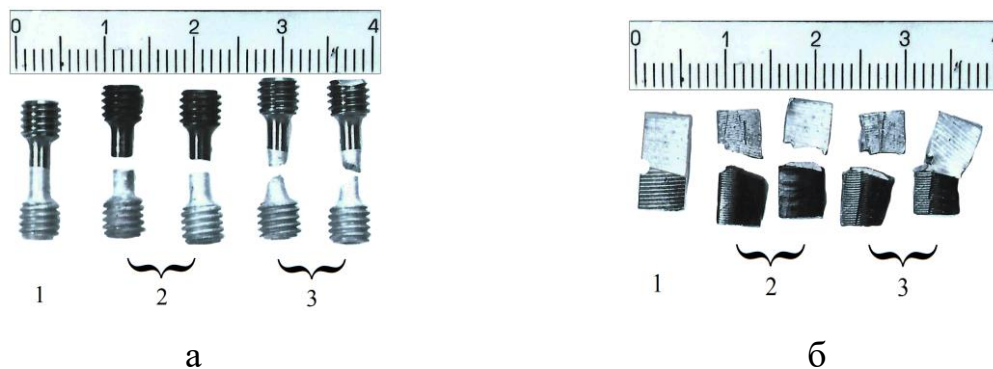


Рисунок 4.9 - Разрушение образцов при испытаниях на растяжение (а) и ударный изгиб (б): 1 – исходный образец; 2 – из зоны очага деформации; 3 – из готового изделия

Результаты испытаний на растяжение и ударный изгиб при комнатной температуре показали высокую прочность соединения ( $\sigma_s = 430 \div 440$  МПа,  $\sigma_{0,2}$

= 320 ÷ 340 МПа,  $\delta = 8 \div 10 \%$ ,  $KCU = 0,0105 \div 0,018$  кДж/м<sup>2</sup>), что соответствует свойствам сплава 1201. В зоне 3 разрушение всех образцов происходило по сплаву 1201. Герметичность соединения слоев проверяли на готовых изделиях – переходниках, применяя гелиевый течеискатель Pfeiffer Vacuum ASM 340. Герметичность находится в интервале от  $5 \cdot 10^{-13}$  до  $1 \cdot 10^{-2}$  Па/с · м<sup>3</sup>, а скорость протекания гелия составляет 30 ÷ 34 мг/с, что соответствует техническим требованиям к переходникам.

Результаты испытаний позволили рекомендовать разработанную технологию для внедрения в промышленное производство (приложение 2 – Технологические рекомендации; приложение 3 – Акты внедрения результатов работы).

#### **4.3. Совершенствование технологии холодной прокатки шестигранных прутков из титанового сплава ВТ16 для изготовления деталей крепления конструкций летательных аппаратов**

Надежность соединений конструкций летательных аппаратов во многом определяет качество деталей крепления. Процесс производства и применения титановых гаек совпадает с началом промышленного освоения обработки титана давлением. Это обусловлено тем, что удельная прочность титановых сплавов на 50-60% выше, чем у конструкционных сталей, а замена деталей крепления из сталей на детали из титановых сплавов позволяет снизить массу элементов примерно на 35-40%.

Известно, что наиболее рациональная и высокопроизводительная технология изготовления титановых крепежных деталей, предназначенных для применения в конструкциях, работающих при температуре до 473 К, предусматривает холодную деформацию [57]. Исходя из этого, сплав для деталей крепления должен иметь низкое сопротивление деформации при обработке давлением и высокие прочностные характеристики в готовом изделии.

Наиболее удачным сочетанием механических свойств применительно к деталям крепления обладает сплав ВТ16 (Ti-3Al-4,5V-5,0Mo) [37]. Сплав содержит небольшое количество алюминия, что обеспечивает достаточную технологическую пластичность, а легирование  $\beta$  – изоморфными стабилизаторами позволяет проводить упрочняющую термическую обработку. Поэтому сплав ВТ16 относится к числу наиболее пригодных для производства титанового крепежа холодным пластическим деформированием.

Действующая технологическая схема производства титановых гаек размером «под ключ» S 8; 10; 13; 17; 19 состоит из 10 операций (рис. 4.10). 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.

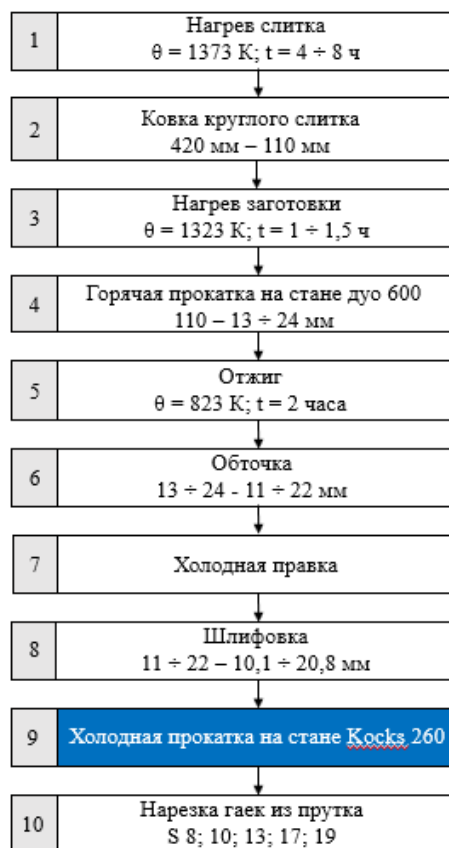


Рисунок 4.10 - Технологическая схема производства титановых гаек



Холодную прокатку осуществляют на стане Kocks 260 (табл. 4.4).

Таблица 4.4 - Основные технические характеристики прокатного стана  
Kocks 260

Параметр	Значение
Мощность привода, кВт	500
Максимальное количество клеток	8
Скорость прокатки, м/с	0,01 ÷ 1
Диаметр валков, мм	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 сопротивления деформации (4.1) и пластичности (4.2) сплава ВТ16 на ПВД при «комнатной» температуре (глава 3, рис. 3.4; рис. 3.5) [58]:

$$\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon, \xi) \quad (4.1)$$

$$A_p = A_p(\xi, k), \quad (4.2)$$

Пластометрические исследования и промышленное опробование новых технологических режимов холодной прокатки проводили на горячекатаных прутках диаметром (10,1 ÷ 20,8 мм) из сплава ВТ16, изготовленных по промышленной технологии на ВСМПО-АВИСМА<sup>1</sup>. Химический состав сплава приведен в табл. 4.5.

Таблица 4.5 - Химический состав исследованного титанового сплава  
ВТ16

Легирующие элементы, масс. %				Примеси (не более), масс. %						
Ti	Al	V	Mo	Si	H <sub>2</sub>	C	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Fe	Zr
Основа	2,3	4,7	5,1	0,12	0,09	0,06	0,03	0,11	0,18	0,24

Для исследований реологии сплава использовали образцы для испытаний на растяжение, сжатие и кручение, причем растяжение и кручение

<sup>1</sup> Нормативная ссылка: ОСТ 1 90202-75 «Прутки горячекатаные из сплава марки ВТ16».

применяли для построения диаграмм пластичности, а сжатие, в основном, для диаграмм сопротивления деформации. Испытания проводили при холодной деформации на ПВД, установленном на вертикальном гидравлическом прессе ДЕ 2432 усилием 1,6 МН. Дело в том, что при растяжении удобно фиксировать момент разрушения образца, а при сжатии осуществлять непрерывный контроль сопротивления деформации до больших ее значений. В главе 2, на рис. 2.6 показаны исходные образцы, а на рис. 4.11 - образцы после испытаний.

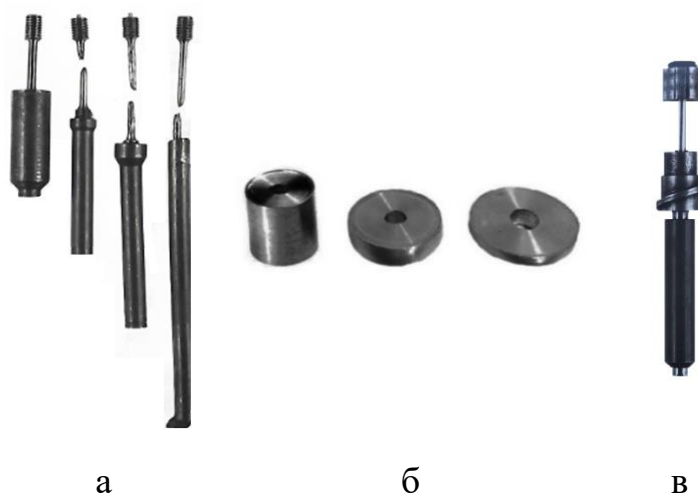


Рисунок 4.11 - Образцы до и после испытаний на ПВД: а) на растяжение; б) на сжатие; в) на кручение

С учетом закона постоянства объема образца, уменьшение его начальной высоты происходит пропорционально увеличению начального диаметра в соответствии с перемещением пуансона в полости контейнера высокого давления:

$$F = \frac{\pi 0,25 d_0^2 h_0}{h_0 - h_{\pi}} \quad (4.3)$$

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

По результатам испытаний на ПВД построены кривые сопротивления деформации, причем, скорости деформации 1,2,3 могут быть реализованы на стане Kocks 260 (рис. 4.12).

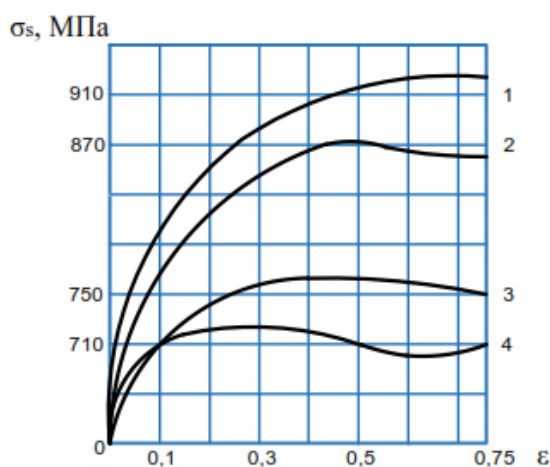


Рисунок 4.12 - Изотермический разрез объемной диаграммы сопротивления деформации представленной на рис. 3.3 по четырем скоростям деформации

входящим в диапазон работы ПВД: 1 –  $\xi = 2 \cdot 10^{-4} \text{c}^{-1}$ ; 2 –  $\xi = 4 \cdot 10^{-2} \text{c}^{-1}$ ; 3 –  $\xi = 7 \cdot 10^1 \text{c}^{-1}$ ; 4 –  $\xi = 9 \cdot 10^1 \text{c}^{-1}$

Установлено, что деформационное поведение сплава VT16 в процессе холодной деформации существенно зависит от скорости деформации. Общим для всех кривых является высокая интенсивность упрочнения в начальной стадии деформации, когда действие релаксационных процессов еще не проявляется. Затем, начиная от  $\varepsilon = 0,1 \div 0,2$ , скорость деформации меняет не только уровень кривых сопротивления деформации, но и их характер, поскольку меняется механизм процессов упрочнения – разупрочнения, протекающий в металле при конкретных условиях деформирования. На рис. 4.12 кривые 1 и 2 характеризуются интенсивным упрочнением и отсутствием  $\sigma_{max}$ , причем кривая 2 указывает на процесс разупрочнения сразу после восходящей части до достижения постоянного значения  $\sigma_s$  и продолжается при непрерывно изменяющемся усилии деформации. Кривая 3 характеризуется положительным деформационным упрочнением, после чего

продолжается наклон кривой до окончания деформации. Кривая 4 отличается от кривой 2 тем, что не имеет четко выраженного участка установившегося течения, а по достижении степени деформации  $\varepsilon = 0,5 \div 0,6$  имеет место повторное упрочнение. Анализ кривых  $\sigma_s$  позволил установить оптимальную среднюю скорость деформации для ее реализации при прокатке сплава ВТ16 на стане Коскс 260. Эта скорость соответствует кривой 3 поскольку скорость деформации  $9 \cdot 10^1 \text{с}^{-1}$  для имеющих место условий прокатки недостижима.

Увеличение скорости деформации от  $2 \cdot 10^{-4}$  до  $9 \cdot 10^1 \text{с}^{-1}$  приводит к снижению пластичности, зависящей, в основном, от  $k$  (рис. 4.13).

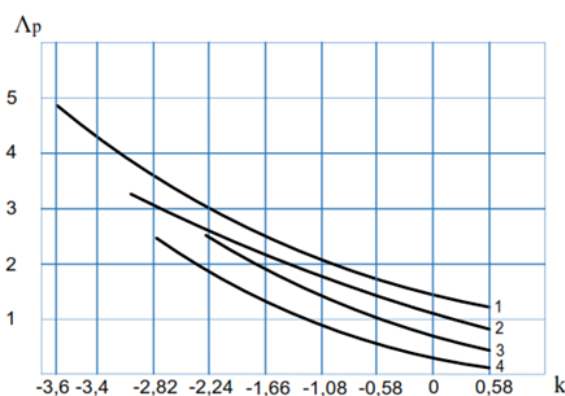


Рисунок 4.13 - Изотермический разрез объемной диаграммы, представленной на рис. 3.6 по четырем скоростям деформации: 1 –  $\xi = 2 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1}$ ; 2 –  $\xi = 4 \cdot 10^{-2} \text{с}^{-1}$ ; 3 –  $\xi = 7 \cdot 10^1 \text{с}^{-1}$ ; 4 –  $\xi = 9 \cdot 10^1 \text{с}^{-1}$

Диаграмму пластичности  $\Delta_p(k)$  строили после обработки результатов трех видов испытаний по соответствующим формулам (глава 3, уравнения 3.3 – 3.5).

Анализ кривых пластичности показал, что диапазон показателя напряженного состояния при испытаниях на растяжение, сжатие и кручение изменялся от 0,58 до -3,6, т. е. охватывал все возможные значения, имеющие место в очаге деформации при различных видах ОМД. Показатель напряженного состояния варьировали изменением гидростатического

давления рабочей среды в контейнере ПВД, рассчитанным по формуле Н.Н. Давиденкова (4.4) [8]:

$$k = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{3d}{4R} \right) - \frac{p}{0,58\sigma_S} \quad (4.4)$$

Путем планирования эксперимента и статистической обработки результатов исследований осуществлена аппроксимация опытных данных и предложены зависимости (4.5) и (4.6), расчет коэффициентов которых для скорости деформации  $7 \cdot 10^1 \text{с}^{-1}$  выполнен с использованием программы обработки данных Statistica.

$$\sigma_S = b_4 \frac{\varepsilon^{b_2} \times \xi^{b_3}}{\sqrt{3}} b_1 \quad (4.5)$$

$$A_p = [y_{\varepsilon 2} - (y_{\varepsilon 1} - y_{\varepsilon 2})\xi] \exp\{[\varphi_{\varepsilon 2} - (\varphi_{\varepsilon 1} - \varphi_{\varepsilon 2})\xi]k\} \gamma_{\varepsilon} \quad (4.6)$$

В табл. 4.6 приведены коэффициенты уравнения (4.5).

Таблица 4.6 - Коэффициенты уравнения (4.5)

$\varepsilon, \%$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
0,1 (10)	11,82	0,02	0,01	751,02
0,5 (50)	241,54	1,12	0,05	222,14
0,75 (75)	229,32	0,05	0,02	167,21
0,85 (85)	229,32	0,03	0,01	331,02

В табл. 4.7 приведены коэффициенты уравнения (4.6).

Таблица 4.7 - Коэффициенты уравнения (4.6)

$k$	$y_{\varepsilon 1}$	$y_{\varepsilon 2}$	$\varphi_{\varepsilon 1}$	$\varphi_{\varepsilon 2}$	$\gamma_{\varepsilon}$
- 0,58	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	0,2	0,11	0,16
- 1,6	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	0,3	0,30	2,36
- 2,6	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-2}$	0,15	0,14	0,17
- 3,6	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	0,020	0,011	0,01

Аппроксимирующие зависимости (4.5) и (4.6) удовлетворительно совпадают с экспериментальными результатами и их целесообразно использовать в расчетах процессов холодной деформации сплава ВТ16. Как показали результаты статистической обработки опытных данных, суммарная ошибка  $S_e$  не превышает 7 %.

При выборе новой схемы прокатки прутков в условиях конкретного производства учитывали факторы, ограничивающие величину обжатий: угол захвата металла валками, прочность деталей рабочей клетки, допустимая нагрузка двигателей стана.

Выполненные в работе исследования по сопротивлению деформации и предельной пластичности сплава ВТ16 на ПВД, показали, что с целью усовершенствования базового технологического процесса холодной прокатки, возможно сокращение числа проходов с 5 до 2 с сохранением количества суммарных обжатий. Деформационный режим прокатки представлен в табл. 4.8, а диаграмма распределения обжатий по проходам для одного из прутков приведена на рис. 4.14. Расчет энергосиловых параметров прокатки осуществляли по методике А.И. Целикова [59]. При этом значения энергосиловых параметров прокатки не превышают допустимых значений.

Таблица 4.8 - Деформационный режим, энергосиловые и скоростные параметры усовершенствованного технологического процесса холодной прокатки сплава ВТ16

Номер прутка	$D_{пр}$ , мм	$S$ , мм <sup>2</sup>	$\Delta h$ , мм	$\varepsilon$ , %	$p_{ср}$ , МПа	$M_{пр}$ , МН·м	$v$ , м/с	$\omega$ , об/мин	$\xi$ , с <sup>-1</sup>
1	10,1	9,1	1	10	750	68,3	0,5	900	$7 \cdot 10^1$
	9,1	8,6	0,5	5	753	74,5	0,47	890	$7,3 \cdot 10^1$
2	11,7	10,9	0,8	7	754	76	0,53	875	$7,5 \cdot 10^1$
	10,9	10,5	0,4	4	757	86,3	0,48	850	$7,7 \cdot 10^1$
3	14,4	13,7	0,7	5	758	101,1	0,63	830	$8 \cdot 10^1$
	13,7	13,2	0,5	4	760	106,2	0,58	815	$8,3 \cdot 10^1$
4	19,9	18,8	1,1	6	761	138,6	0,82	790	$8,9 \cdot 10^1$
	18,8	17,8	1	5	764	146,7	0,75	760	$9,1 \cdot 10^1$
5	20,8	20	0,8	4	765	144	0,8	735	$9,4 \cdot 10^1$
	20	19,4	0,7	3	769	149	0,75	710	$9,6 \cdot 10^1$

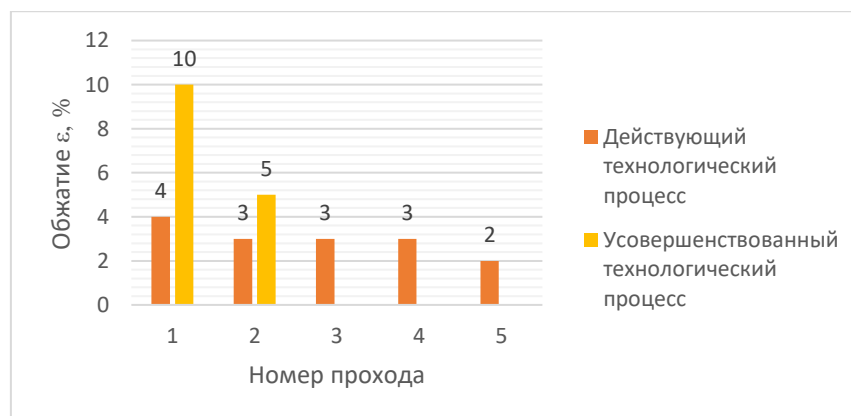


Рисунок 4.14 - Распределение обжатий по проходам для прутка номер 1 (табл. 4.6)

Холоднокатанные шестигранные прутки отличаются высоким качеством поверхности, точностью геометрических размеров, полнотой заполнения углов в вершинах шестигранника (рис. 4.15, а). По усовершенствованной

технологии изготовлена партия гаек размером «под ключ» S 8; 10; 13; 17; 19 (рис. 4.15, б).



Рисунок 4.15 - 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  $120^\circ$ , 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. Следует отметить, что часовая производительность стана холодной прокатки возросла на 12,7 %, а годовая – на 11,5 % (приложение 2 – Технологические рекомендации; приложение 3 – Акты внедрения результатов работы).



## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. На основе комплекса технических приемов и изобретений разработана технология изготовления биметаллических труб ВТ6с÷1201. Технология предусматривает сборку биметаллической заготовки с токоизолированным вакуумированным зазором между компонентами, её градиентный нагрев электроконтактным способом и последующее горячее гидропрессование.

2. Технологические параметры процесса, расчет температурного профиля биметаллической заготовки и температурно-скоростные условия горячего гидропрессования рассчитаны на основе предварительно установленных, с использованием пластометров высокого давления, закономерностей взаимосвязи сопротивления деформации и предельной пластичности компонент от температуры, степени, скорости деформации и показателя напряженного состояния.

3. Градиентный нагрев биметаллической заготовки с вакуумированным зазором между токоизолированными компонентами позволил обеспечить допустимое для совместной деформации соотношение между сопротивлением деформации компонент в пределах  $\frac{\sigma_{s\text{ВТ6с}}}{\sigma_{s1201}} = 2,9 \div 3,4$ .

4. Качество изделий подтверждено стабильностью размеров по длине и сечению биметаллических труб, результатами исследования макро-, микроструктуры и оценкой прочно-плотности соединения, что позволило рекомендовать разработанную технологию в промышленное производство.

5. По результатам испытаний на растяжение, кручение и сжатие образцов новой конструкции на ПВД установлены закономерности взаимосвязи сопротивления деформации и пластичности сплава ВТ16 со скоростью деформации ( $2 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1} \div 9 \cdot 10^1 \text{с}^{-1}$ ) в диапазоне показателя напряженного состояния ( $0,58 \div -3,6$ ). На основе новой экспериментальной информации предложены формулы для определения  $\sigma_s$  и  $A_p$  в диапазоне возможных режимов холодного пластического формоизменения сплава.

6. Достигнутые результаты использованы для разработки рекомендаций по назначению рациональных, с точки зрения качества изделий и производительности оборудования, режимов обжатий при холодной прокатке титановых шестигранных прутков из сплава ВТ16 размером «под ключ» S 8; 10; 13; 17; 19.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработан и применен в работе пластометр высокого давления для испытаний образцов на растяжение и сжатие при температуре  $293 \text{ K} \div 1073 \text{ K}$ , скорости деформации  $2 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1} \div 9 \cdot 10^1 \text{ c}^{-1}$  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  $\Lambda_p = [y_{\varepsilon 2} - (y_{\varepsilon 1} - y_{\varepsilon 2})\xi] \exp\{[\varphi_{\varepsilon 2} - (\varphi_{\varepsilon 1} - \varphi_{\varepsilon 2})\xi]k\} \exp\left[\gamma_{\varepsilon} \left(\frac{\theta_{min}}{\theta_{max}}\right)^{\delta_3}\right]$ . 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 течении 480 с электроконтактным способом (ВТ6с до 973 ÷ 1073 К, 1201 до 383 ÷ 413 К) и последующее горячее гидропрессование. Изготовлены биметаллические трубы композиции ВТ6с÷1201 внешним диаметром 25 ÷ 28 мм, внутренним диаметром 17 ÷ 19 мм, диаметром отверстия 10 мм, длиной 997 мм (после обрезки концов для испытаний) с чистой и гладкой поверхностью и минимальной неравномерностью распределения слоев по длине. При испытаниях прочности соединения на разрыв и ударный изгиб разрушения 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 (приложение 2) и подтверждены технико-экономическим актом промышленного опробования (приложение 1). 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»

(приложение 2) и подтверждены актом внедрения, утвержденным проректором МАИ по учебной работе (приложение 1).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелик С. С., Добаткин С. В., Капуткина Л. М. Рекристаллизация металлов и сплавов. –3-е изд. – М.: МИСИС, 2005. – 432 с.
2. Калпин Ю.Г., Перфилов В.И., Петров П.А., Рябов В.А., Филиппов Ю.К. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением. - М.: 2011, 1-46 с.
3. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
4. Потапов А.И., Гладковский С.В., Коковихин Е.А., Салихьянов Д.Р., Двойников Д.А. Определение сопротивления пластической деформации металлических материалов на автоматизированном пластометрическом комплексе// *Diagnostics, resource and mechanics of materials and structures*. 2015. №2. с. 24-43.
5. J. L. Bucaille, S. Stauss, E. Felder, J. Michler. Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters. *Acta materialia*. – 2003. – Vol. 51.– P. 1663–1678.
6. Коновалов Д. А., Смирнов С. В., Вичужанин Д. И. Определение сопротивления деформации по результатам вдавливания конических инденторов // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2007. – № 3. – С. 69–70.
7. Smirnov S. V., Smirnova E. O. A technique for determining coefficients of the "stress- strain" diagram by nanoscratch test results. *Journal of Materials Research*. – 2014. – Vol. 29, № 16, P. 1730–1736.
8. Колмогоров, В. Л. Напряжения. Деформации. Разрушение /В. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.
9. Шоршоров М.Х., Колесниченко В.А., Алехин В.П. Клинопрессованная сварка давлением разнородных металлов. М.: Металлургия, 1982. 112 с.
10. Король В. К., Гильденгорн М. С. Основы технологии производства многослойных металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 240 с.

11. Соколов Л.Д. Сопротивление металлов пластической деформации. М.: Металлургиздат, 1963. - 284 с.
12. Мочалов Н.А., Галкин А.М., Мочалов С.Н., Парфенов Д.Ю. Пластометрические исследования металлов. - М.: Интермет инжиниринг, 2003. - 317с.
13. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. - М.: Металлургиздат, 1961. - 376с.
14. Полухин П.И., Горелик С.С., Вороцов В.К. Физические основы пластической деформации. - М.: Металлургия, 1982. - 584с.
15. Галкин А.М., Полухин П.И., Косырев В.К. Пластическая деформация сталей и сплавов. - М.: Мисис, 1996.
16. Парфенов Д.Ю. Исследование реологических свойств и определение режимов обработки сложнлегированных сплавов на основе меди в условиях горячей деформации. - М.: Дис. на соискание ст. к.т.н. 2000.
17. Ван Трыонг Кау. Исследование пластичности сопротивления деформации легких сплавов с применением математических методов планирования эксперимента. Дис. на соискание ст.к.т.н. 1979.
18. Потапов А. И., Мазунин В. П., Двойников Д. А., Коковихин Е. А. Методика исследований сопротивления деформации на пластометрическом комплексе. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – Т. 76, № 9. – С. 59–63.
19. Гун Г.Я., Косырев В.К., Галкин А.М. Теория и технология деформации металлов. - М.: Металлургия, 1976. №96. - с 73-77.
20. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. Т. 2. М.: Металлургиздат, 1961.
21. Ильюшин А.А. Пластичность. Изд-во АН СССР, 1963.
22. Потапов А.И., Мигачев Б.А., Колмогоров В.Л. К методике определения пластичности металлов осадкой. Кузнечно-штамповочное производство. 1975. №10. С. 6-9.

23. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. М.: Машиностроение, 1971. 200 с.
24. Унксов Е.П. Инженерная теория пластичности. М.: Машгиз, 1959. 328 с.
25. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Кузнечно-штамповочное производство. 1977. №3. С. 15-18.
26. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. М.: МИР, 1972. 408 с.
27. Бережковский Д.И., Барабанов С.П., Окорокова Н.А. Оценка деформируемости по результатам испытаний на кручение. Кузнечно-штамповочное производство. 1981. №7. С. 10-12.
28. Beresnev V.I. [et al.] Some problems of large plastic deformation of metals at high pressure. New York: Pergamon press, 1963. 79 p.
29. Lewandowski J.J., Lowhaphandu P. Effects of hydrostatic pressure on mechanical behaviour and deformation processing of materials. International Materials Reviews, 1998, vol. 43, pp. 145-187.
30. Береснев Б.И., Мартынов Е.Д., Родионов К.П., Булычев Д.К., Рябинин Ю.Н. Пластичность и прочность твёрдых тел при высоких давлениях. М.: Наука, 1970. 160 с.
31. P. Bridgman. The physics of high pressure. London. G. Bell and Sons, LTD. 1931. 398 p.
32. Береснев Б.И., Езерский К.И., Трушин Е.В., Каменецкий Б.И. Высокие давления в современных технологиях обработки материалов. М.: Наука, 1988. 245 с.
33. Потапов А.И., Харитонин С.В. Сопротивление деформации титановых сплавов при температурах теплой и горячей обработки давлением. Заготовительные производства в машиностроении. М.: Инновационное машиностроение. №3. 2013. с. 18-22.
34. Ковалёв Д.С., Шахов В.Н., Богданов В.В. Технологические особенности алюминиевых сплавов 1201 и 01570. Сибирский



государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск. 2014. Т.1, №10, с.104-105.

35. Туманов А.Т. Справочник. Авиационные материалы. Т.4. Деформируемые алюминиевые сплавы. М.: ОНТИ ВИАМ, 1982. – 627 с.

36. Буркин С.П., Бабайлов Н.А., Овсянников Б.В. Сопротивление деформации сплавов Al и Mg. Екатеринбург: Справочное пособие, 2010. – 344 с.

37. Туманов А.Т. Справочник. Авиационные материалы. Т.5. Магниево-титановые сплавы. М.: ОНТИ ВИАМ, 1982. – 583 с.

38. Колпин Ю. Г., Перфилов В.И., Петров П. А., Рябов В. А., Филиппов Ю. К. Сопротивление деформации и пластичность при обработке металлов давлением. М.: Машиностроение, 2011. 244 с.

39. Харсеев В.Е., Петров П. А. Выбор параметров напряженно-деформированного состояния для построения диаграмм пластичности. Технология легких сплавов. М.: ОАО «Всероссийский институт легких сплавов», 2015. №2. С.131 – 144.

40. 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.

41. Колпашников А.И., Вялов В.А., Федоров А. А., Петров А. П. Горячее гидропрессование металлических материалов. М., «Машиностроение», 1977. - 271 с.

42. 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.

43. 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

пределной пластичности металлических материалов на пластометрах высокого давления: технологическая рекомендация – Москва: ИНФРА-М. 2020. – 18 с.

44. Пособие по выполнению лабораторной работы испытания на сжатие образцов материалов. – М.: МГТУ им. Баумана Н.Э., 2015, 1-7 с.

45. Федоров А.А., Беспалов А.В., Соколов А.В. Основные принципы теории пластичности, М.: Изд-во МАИ, 2018. – 100 с.

46. Viba N., Stebunov S. QForm 3D - cost effective simulation tool for metal forming technology. Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, 15th Forging Symposium, 10-11 June, 2010, Changwon, South Korea, p. 77-80.

47. Боровик П.В., Усатюк Д.А. Новые подходы к математическому моделированию технологических процессов обработки давлением/ Дон. гос. техн. ун-т. – Алчевск, 2011. – 299 с.

48. 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.

49. 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.

50. Бернштейн М.Л., Добаткин С.В., Капуткина Л.М., Прокошкин С.Д. Диаграммы горячей деформации, структура и свойства сталей. - М.: Металлургия. 1989. - 544с.

51. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. - М.: Металлургия. 1979. - 208 с.

52. Ильин А.А., Скворцова С.В., Овчинников А.В., Ручина Н.В. Влияние структуры сплава ВТ16 на его технологическую пластичность. Авиационная промышленность, 2006 г, №3, с.43-49.

53. Колмогоров В.Л. Некоторые актуальные задачи теории обработки металлов давлением. М.: ВИЛС, 1979 г., 124 с.

54. Sá, Joaquim. Applied Statistics Using Spss, Statistica, Matlab and R. — Berlin: Springer, 2007. — ISBN 3540719717.

55. Shoaib Ahmed, Prashant Singh, Srinath V. Ekkad. Three-Dimensional Transient Heat Conduction Equation Solution for Accurate Determination of Heat Transfer Coefficient. J. Heat Transfer. May 2020, Vol. 142 (5). 051302 (12 pages).

56. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. М.: ГИТТ. 1954. – 795 с.

57. Колачев Б.А., Елисеев Ю.С., Братухин А.Г., Талалаев В.Д. Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической техники. М.: МАИ, 2001. – 411 с.

58. Федоров А.А., Беспалов А.В., Комаров Р.С. Пластометры высокого давления. Журнал «Технология машиностроения». №4, М, 2020. – 48-53 с.

59. Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И., Третьяков А.В., Никитин Г.С. Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

Акты внедрения результатов работы

«УТВЕРЖДАЮ»  
 Генеральный директор ООО «Мегаметалл»  
 к.т.н. Елагин Д. В.  
 «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.



**АКТ**

**промышленного опробования результатов диссертационной работы  
 Комарова Р. С. на тему: «Экспериментальное исследование реологии  
 металлов при высоких гидростатических давлениях с целью  
 совершенствования процессов пластического формоизменения»**

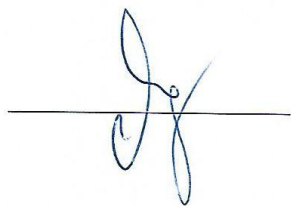
Настоящий акт составлен в том, что в соответствии с планом выполнения совместной с «МАИ» НИР на тему: «Установление закономерностей взаимосвязи сопротивления деформации металлов с температурой, степенью и скоростью деформации и разработка на основе исследований новых технологических процессов пластической деформации» на предприятии опробованы процессы изготовления, впервые, биметаллических труб ВТ6с ÷ 1201 из сплавов со значительным различием сопротивления деформации, и усовершенствована технология холодной прокатки прутков из титанового сплава ВТ16.

Технологические процессы разработаны на основе новых сведений о реологии сплавов ВТ6с, 1201 и ВТ16, установленных с применением пластометров высокого давления. Новые технологические процессы отражены в совместно разработанных технологических рекомендациях:

1. «Определение сопротивления деформации и предельной пластичности металлических материалов на пластометрах высокого давления»;
2. «Производство композиционных труб для переходных элементов соединений деталей и узлов из разнородных металлов»;
3. «Производство титановых профилей для изготовления деталей крепления агрегатов и узлов летательных аппаратов».

Использование результатов работы Комарова Р.С. позволило впервые разработать технологию производства биметаллических труб для изготовления переходных элементов соединений деталей и узлов из разнородных металлов и усовершенствовать технологию холодной прокатки шестигранных прутков из титанового сплава ВТ16 для изготовления деталей крепления конструкций летательных аппаратов. Позволило получить шестигранные прутки, полностью удовлетворяющие условиям ТУ-1825-002-44447957-2009. Путем оптимизации схем прокатки прутков удалось обеспечить достижение заданных значений по параметру:- диаметр описанной окружности на всем сортаменте профилей при сохранении качества изделий.

Настоящий акт не является основанием для финансовых расчетов.



Технический директор  
ООО «Мегаметалл»

Луговской В. А.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе МАИ, доцент, д.т.н.  
\_\_\_\_\_ Козорез Д.А.  
\_\_\_\_\_ 2020 г.



### АКТ

**внедрения результатов кандидатской диссертации Комарова Р.С. на тему: «Экспериментальное исследование реологии металлов при высоких гидростатических давлениях с целью совершенствования процессов пластического формоизменения» в учебный процесс.**

Теоретические положения, методические разработки и методы проектирования установок для создания высоких гидростатических давлений представленных в работе, представлены в «рабочих планах дисциплин» и внедрены в учебный процесс подготовки магистров по направлению 22.04.02 «Обработка металлов давлением». Материалы работы используются для чтения лекций и проведения практических занятий по трем дисциплинам:

1. «Теория пластичности»;
2. «Физика и техника высоких давлений»;
3. «Теория и технология гидропрессования».

Для студентов кафедры ТиСАПРМП издано в 2020 году методическое руководство к практическим занятиям по «Физике и технике высоких давлений» на тему: «Расчет конструкций вспомогательных образцов для пластометров высокого давления».

Материалы работы отражены в трех научно-исследовательских магистерских диссертациях 2018 – 2020 гг.

Директор института  
«Материаловедения и технологий  
материалов»



Доцент, к.т.н. Беспалов А.В.

Заведующий каф. ТиСАПРМП



Профессор, д.т.н. Моисеев В.С.

Научный руководитель



Профессор, д.т.н. Федоров А.А.

**Технологические рекомендации и методические указания для  
студентов**



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(национальный исследовательский университет)»

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ РЕКОМЕНДАЦИЯ**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ  
И ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ПЛАСТОМЕТРАХ  
ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**





МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(национальный исследовательский университет)»

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ РЕКОМЕНДАЦИЯ

**ПРОИЗВОДСТВО  
КОМПОЗИЦИОННЫХ ТРУБ  
ДЛЯ ПЕРЕХОДНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ СОЕДИНЕНИЙ  
ДЕТАЛЕЙ  
И УЗЛОВ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ  
МЕТАЛЛОВ**



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(национальный исследовательский университет)»

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ РЕКОМЕНДАЦИЯ

# ПРОИЗВОДСТВО ТИТАНОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ КРЕПЛЕНИЯ АГРЕГАТОВ И УЗЛОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(национальный исследовательский университет)»

## МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО

### РУКОВОДСТВО К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ ПО ФИЗИКЕ И ТЕХНИКЕ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

*Работа №1.*

*Расчет конструкции вспомогательных образцов  
для пластометров высокого давления*

Патенты

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2627957

**Цилиндрический образец для испытания на сжатие**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (RU)*

Авторы: *Федоров Анатолий Александрович (RU), Петров Анатолий Павлович (RU), Беспалов Александр Владимирович (RU), Луговской Владимир Анатольевич (RU), Комаров Роман Сергеевич (RU)*

Заявка № 2016138066

Приоритет изобретения 26 сентября 2016 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 14 августа 2017 г.

Срок действия исключительного права на изобретение истекает 26 сентября 2036 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2655043

### Устройство для испытания образца материала на сжатие при высоких гидростатических давлениях

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (RU)*

Авторы: *Федоров Анатолий Александрович (RU), Петров Анатолий Павлович (RU), Беспалов Александр Владимирович (RU), Комаров Роман Сергеевич (RU)*

Заявка № 2017117507

Приоритет изобретения 19 мая 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений Российской Федерации 23 мая 2018 г.

Срок действия исключительного права на изобретение истекает 19 мая 2037 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2703828

### Способ испытания образцов на разрыв и сжатие при высоких гидростатических давлениях

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (RU)*

Авторы: *Федоров Анатолий Александрович (RU), Беспалов Александр Владимирович (RU), Комаров Роман Сергеевич (RU)*

Заявка № 2019108891

Приоритет изобретения 27 марта 2019 г.

Дата государственной регистрации в


Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 22 октября 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 27 марта 2039 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2709426

### Устройство для испытания образца материала на сжатие в условиях гидростатического давления

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (RU)*

Авторы: *Федоров Анатолий Александрович (RU), Беспалов Александр Владимирович (RU), Комаров Роман Сергеевич (RU)*

Заявка № 2019108890

Приоритет изобретения 27 марта 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 17 декабря 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 27 марта 2039 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев