

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования «Тульский государственный  
университет»

УДК 621.983; 539.374

№ госрегистрации 01201066451

**УТВЕРЖДАЮ**

Ректор ТулГУ

\_\_\_\_\_/М.В. Грязев/  
М.П.  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

**ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

В рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-  
педагогические  
кадры инновационной России» на 2009-2013 годы

**Шифр заявки «2010-1.1-211-078-019»**

**Государственный контракт № 14.740.11.0038 от 01 сентября 2010 г.  
по теме «Развитие теории пластического формообразования кристалличе-  
ских ортотропных материалов с деформационной анизотропией механиче-  
ских свойств»  
(Итоговый)**

Наименование этапа: «Создание технологических принципов разработки но-  
вых наукоемких технологических процессов изготовления ответственных из-  
делий точного машиностроения из высокопрочных кристаллических мате-  
риалов. Создание наукоемких, прогрессивных технологических процессов  
холодной штамповки тонкостенных полусферических и торовых днищ из  
анизотропных кристаллических материалов ракетно-космической техники»

Руководитель проекта: \_\_\_\_\_ д.т.н., профессор Яковлев С.С.

Тула 2012

## Список исполнителей

Научный д.т.н., профессор	руководитель,	_____	Яковлев С.С.
		подпись, дата	
Исполнители			
Проректор по НР профессор, д.ф-м.н., профессор	д.т.н., профес- сор	_____	Кухарь В.Д.
		подпись, дата	
		_____	Матченко Н.М.
		подпись, дата	
		_____	Матченко И.Н.
		подпись, дата	
		_____	Панфилов Г.В.
		подпись, дата	
		_____	Пасько А.Н.
		подпись, дата	
		_____	Коротков В.А.
		подпись, дата	
		_____	Черняев А.В.
		подпись, дата	
		_____	Евдокимов А.К.
		подпись, дата	
		_____	Ларин С.Н.
		подпись, дата	
		_____	Ремнев К.С.
		подпись, дата	
		_____	Ларина М.В.
		подпись, дата	
		_____	Платонов В.И.
		подпись, дата	

доцент, к.т.н.	<hr/>	Агеева А.И.
	подпись, дата	
доцент, к.т.н., доцент	<hr/>	Киреева А.Е.
	подпись, дата	
доцент, к.т.н.	<hr/>	Яковлев Б.С.
	подпись, дата	
доцент, к.т.н.	<hr/>	Пасынков А.А.
	подпись, дата	
аспирант	<hr/>	Бессмертный А.В.
	подпись, дата	
аспирант	<hr/>	Перепелкин А.А.
	подпись, дата	
аспирант	<hr/>	Бессмертная Ю.В.
	подпись, дата	
аспирант	<hr/>	Леонова Е.В.
	подпись, дата	
аспирант	<hr/>	Исаева А.Н.
	подпись, дата	
студент	<hr/>	Лыков С.С.
	подпись, дата	
студент	<hr/>	Лазо А.А.
	подпись, дата	
студент	<hr/>	Бойко О.А.
	подпись, дата	
студент	<hr/>	Матасов И.И.
	подпись, дата	
студент	<hr/>	Лаврушина Г.В.
	подпись, дата	

студент

Карнюшина М.В.

\_\_\_\_\_

подпись, дата

инженер

Миронова О.А.

\_\_\_\_\_

подпись, дата

специалист по УМР

Тулинова Т.Н.

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Нормоконтролер

Герасимова О.М.

\_\_\_\_\_

подпись, дата

## Реферат

Отчет 215 с., 1 ч., 21 рис., 3 табл., 70 источников, 2 прил.

АНИЗОТРОПИЯ, ВЫТЯЖКА, ДЕФОРМАЦИЯ, ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ, КИНЕМАТИКА, МЕТОД, ЛОКАЛЬНАЯ ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ, ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ, РАЗРУШЕНИЕ, РЕВЕРСИВНАЯ ВЫТЯЖКА, РЕКОМЕНДАЦИЯ, СИЛА, СПЛОШНОСТЬ, МИКРОСТРУКТУРА, ТЕКСТУРА, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС, НАПРЯЖЕНИЕ, ПОВРЕЖДЕННОСТЬ, МЕТОДИКА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА.

**Объект исследования:** создание высоких наукоемких технологических процессов изготовления полусферических и полуторовых днищ изделий ответственного назначения методами многоступенчатой вытяжки, реверсивной вытяжки листовых заготовок на базе развития теории пластического формообразования кристаллических ортотропных материалов с деформационной анизотропией механических свойств.

**Цель работы:** научное обоснование и внедрение высоких технологий изготовления корпусных деталей сложной формы (полусферических и полуторовых днищ) ответственного назначения из высокопрочных кристаллических материалов методами пластического формообразования путем повышения пластической деформируемости листовых кристаллических материалов на базе изменения кристаллографической текстуры и характеристик анизотропии механических свойств, путем совершенствования технологий формообразования и термообработки при изготовлении.

Выполнение НИР должно обеспечивать достижение научных результатов мирового уровня, подготовку и закрепление в сфере науки и образования научных и научно-педагогических кадров, формирование эффективных и жизнеспособных научных коллективов.

### **Полученные результаты:**

Разработана теория деформирования анизотропных кристаллических материалов на первой и многоступенчатой операциях вытяжки, реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем с учетом изменения толщины заготовки и упрочнения материала заготовки применительно к изготовлению полусферических и полуторовых днищ. Разработаны экспериментальные основы формирования кристаллографической текстуры и анизотропии механических свойств материалов заготовок для изготовления изделий машиностроения ответственного назначения методами пластического формообразования. Разработаны математические модели первой и многоступенчатой вытяжек, реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из трансверсально-изотропных материалов с учетом изменения толщины заготовки и упрочнения материала заготовки в процессе пластической деформации кристаллических материалов применительно к изготовлению полусферических и полуторовых днищ. Созданы алгоритмы расчетов и пакеты прикладных программ. Установлено влияние анизотропии механических свойств исходных материалов, технологических параметров, геометрических размеров заготовки и инструмента, степени деформации, условий трения контактных поверх-

ностей инструмента и заготовки на кинематику течения материала, напряженное и деформированное состояния заготовки, силовые режимы и предельные возможности формоизменения и формирование показателей качества изготавливаемых осесимметричных деталей.

Показано влияние кристаллографической текстуры на коэффициент нормальной пластической анизотропии гексагональных плотноупакованных – металлов. Выявлено влияние длительности отжига на текстуру листов из гексагональных плотноупакованных – металлов (титановый сплав ПТ-3Вкт). Установление закономерностей изменения текстуры кристаллических материалов при многопереходной штамповке-вытяжке полусферических днищ. Установлено влияние режимов отжига на глубину газонасыщенного слоя полусферических днищ из титанового сплава ПТ-3Вкт. Выявлено влияние структуры и текстуры листового проката титанового сплава ПТ-3кт на характер разрушения в процессе многооперационной вытяжки. Установлены пути управления текстурой и структурой сварных соединений  $\alpha$ -сплавов титана.

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны научно обоснованные технологические решения изготовления крупногабаритных осесимметричных деталей с фланцем многооперационной вытяжкой полусферических днищ применительно к изготовлению деталей и узлов ракетно-космической техники, созданы технологические принципы разработки новых наукоемких технологических процессов изготовления крупногабаритных тонкостенных полусферических днищ из высокопрочных кристаллических материалов, методики по расчету технологических параметров многооперационной ступенчатой вытяжки без утонения стенки. Разработан новый технологический процесс холодной штамповки заготовок для изготовления полусферических днищ из высокопрочного титанового сплава ПТ-3Вкт толщиной 3,5 мм с геометрическими соотношениями  $s/D < 0,003$  и  $H/D = 0,5$ , основанный на методе ступенчатого набора в универсальных сборных переналаживаемых штампах с последующей калибровкой и химическим фрезерованием. При холодной штамповке листового материала в универсальных штампах (матричных кольцах) нет необходимости в дорогостоящих штампах с обогревом, значительно повышается культура производства, снижается травматизм. Холодная штамповка более экономична с точки зрения энергозатрат. По сравнению с вариантом получения титановых полусферических днищ механической обработкой заготовок, полученных методом горячей объемной штамповки, способ позволяет снизить трудоемкость механической обработки с 20 смен до 2 часов.

Создан наукоемкий технологический процесс изготовления заготовок детали «диафрагма» под калибровку и последующую ротационную вытяжку из алюминиевого сплава А5М толщиной 3,5 мм с геометрическими соотношениями  $s/D < 0,003$  и  $H/D = 0,5$  методом ступенчатого набора. Новые технологические процессы ступенчатой вытяжки приняты к внедрению в производство на закрытом акционерном обществе «Завод экспериментального машиностроения ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Ко-

ролева» со значительным экономическим эффектом, полученным за счет снижения трудоемкости изготовления и обеспечения качества цилиндрических деталей.

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны научно обоснованные технологические решения изготовления крупногабаритных полуторовых днищ реверсивной вытяжкой применительно к изготовлению деталей и узлов ракетно-космической техники, рекомендации по расчету технологических параметров процесса реверсивной вытяжки полуторовых днищ. Результаты этих работ использованы при проведении научно-исследовательских и технологических работ по совершенствованию технологического процесса изготовления полуфабрикатов полуторовых деталей из тонколистового алюминиевого сплава АМг6. Технологический процесс обеспечивает изготовление полуторовых днищ с минимальной величиной разностенности (до 8 %), заданную величину степени использования ресурса пластичности, эксплуатационные требования и снижение трудоемкости их изготовления, сокращение сроков подготовки производства. При штамповке в холодную в универсальных штампах (матричных кольцах) нет необходимости в дорогостоящих штампах с обогревом, значительно повышается культура производства, снижается травматизм. Холодная штамповка более экономична с точки зрения энергозатрат.

По результатам научных исследований 2012 году опубликованы одна монография, опубликованы и подготовлены к опубликованию 60 научных работ в ведущих научных журналах, рекомендуемых ВАК Российской Федерации; 25 статей в межвузовских сборниках научных трудов, а также опубликовано 14 тезисов докладов в сборниках трудов международных и Всероссийских научно-технических конференций. Проведены патентные исследования. 1. Подана заявка на изобретение №2012131813 от 24.07.2012 МПК 8 В21J5/12. Способ и устройство для изготовления ребристых панелей / Коротков В.А., Яковлев С.С., Чудин В.Н., Ларин С.Н., Пасынков А.А., Перепелкин А.А.

По результатам научно-исследовательской работы подготовлены к защите одна докторская диссертационная работа и две кандидатские диссертационные работы по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением. Подготовлено 8 магистров по направлению «Технологические машины и оборудование», программам подготовки «Теория и технология штамповки анизотропных заготовок», «Высокоскоростные методы обработки металлов давлением» и «Высокоэффективные технологические процессы листовой и объемной штамповки».

Результаты научно-исследовательской работы использованы при модернизации учебных планов подготовки бакалавров техники и технологии направления 150700 «Машиностроение» профиль «Машины и технология обработки металлов давлением» и студентов, обучающихся по направлению 150200 «Машиностроительные технологии и оборудование» специальности 150201 «Машины и технология обработки металлов давлением», при выполнении курсовых работ и дипломных проектов, а также учебных планов под-

готовки магистров по направлениям подготовки 150400 «Технологические машины и оборудование» программ подготовки: 15040039 "Теория и технология штамповки анизотропных материалов", 15040041 «Высокоэффективные технологические процессы листовой и объемной штамповки», 15040040 «Высокоскоростные методы обработки металлов давлением».

Отдельные результаты исследований использованы при разработке методических указаний по проведению лабораторных работ по курсу «Теория обработки металлов давлением» в виде новых занятий, при создании конспекта лекций по дисциплине «Физические основы пластической деформации», при выполнении курсовых работ и дипломных проектов.

При выполнении научно-исследовательской работы привлекались студенты в качестве непосредственных исполнителей НИР. Студентами, привлекаемыми к выполнению НИР, получено 5 Дипломов лауреатов Всероссийской и Международной научно-технической конференции. На базе кафедры «Механика пластического формоизменения» ГОУ ВПО «Тульский государственный университет» проведена Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (Тула: ТулГУ, 2012 г.). Исполнителями НИР опубликованы 2 научно-методические статьи.

По результатам научных исследований опубликованы два учебных пособия. Опубликовано две научно-методические статьи.

Два члена творческого коллектива награждены Знаком почета «Союза научных и инженерных общественных объединений Тульской области» (2012 г.), три члена награждены Юбилейной медалью «300-летие начала Государственного оружейного производства в г. Туле» (2012 г.), а также члены творческого коллектива награждены Почетной грамотой Министерства образования и науки РФ (2012 г.), Почетной грамотой Тульской областной Думы (2012 г.), Почетной грамотой администрации города Тулы (2012 г.), Почетной грамотой Тульского государственного университета (2012 г.) и т.д.

**Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели.**

Теоретическое значение результатов работы состоит в развитии теории деформирования листовых заготовок из кристаллических ортотропных материалов с анизотропным упрочнением. Разработана теория деформирования анизотропных кристаллических материалов на первой и многоступенчатой операциях вытяжки, реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем с учетом изменения толщины заготовки и упрочнения материала заготовки применительно к изготовлению полусферических и полуторовых днищ. Разработаны математические модели первой и многоступенчатой вытяжек, реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из трансверсально-изотропных материалов с учетом изменения толщины заготовки и упрочнения материала заготовки в процессе пластической деформации кристаллических материалов применительно к изготовлению полусферических и полуторовых днищ. Созданы алгоритмы расчетов и пакеты прикладных программ. Установлено влияние анизотропии механических свойств исходных

материалов, технологических параметров, геометрических размеров заготовки и инструмента, степени деформации, условий трения контактных поверхностей инструмента и заготовки на кинематику течения материала, напряженное и деформированное состояния заготовки, силовые режимы и предельные возможности формоизменения и формирование показателей качества изготавливаемых осесимметричных деталей.

Разработаны экспериментальные основы формирования кристаллографической текстуры и анизотропии механических свойств материалов заготовок для изготовления изделий машиностроения ответственного назначения методами пластического формообразования.

Разработанная теория деформирования заготовок из кристаллических ортотропных материалов с анизотропным упрочнением расширяет возможности и подходы к анализу процессов пластического формоизменения деталей ответственного назначения. Использование этой теории внесет значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса.

Данные теоретические положения использованы при создании научного обоснования и внедрении высоких наукоемких технологий изготовления полусферических и полуторовых днищ ответственного назначения из высокопрочных кристаллических материалов методами пластического формообразования (многооперационной вытяжки, реверсивной вытяжки, ротационной вытяжки) путем повышения пластической деформируемости кристаллических ортотропных материалов на базе изменения кристаллографической текстуры и характеристик анизотропии механических свойств, путем совершенствования технологий формообразования и термообработки при изготовлении. Проведенный обзор зарубежной и отечественной литературы показал отсутствие аналогичного направления исследований. Теоретический уровень полученных результатов сопоставим с мировым, а по ряду позиций опережает аналогичные зарубежные разработки в данной области науки.

Научные результаты, полученные на базе разработанной теории деформирования заготовок из кристаллических ортотропных материалов с анизотропным упрочнением, являются оригинальными и отличаются от известных работ комплексной постановкой задач исследований в данной области науки применительно к изготовлению тонкостенных полусферических и торовых днищ ракетно-космической техники: учетом анизотропии механических свойств материала заготовки; отказом от гипотезы постоянства толщины стенки вдоль дуги окружности оболочки, разработкой принципиально новых математических моделей первой и многоступенчатой вытяжек, реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из трансверсально-изотропных материалов с учетом изменения толщины заготовки и упрочнения материала в процессе пластической деформации кристаллических материалов.

Разработанные комплексы технологий и научное обеспечение производственных процессов пластического формообразования высокопрочных анизотропных материалов позволяют повысить удельную прочность деталей на 20...30 %; снизить массу деталей и узлов на 20...25 %; увеличить коэффи-

циент использования материала с 0,4 до 0,8, а сроки подготовки производства и трудоемкость изготовления изделий сократить в 1,5...2 раза. Получен патент на изобретение. Подана заявка на изобретение.

Результаты работы будут иметь государственное значение и внесут значительный вклад в экономику страны и повышение ее обороноспособности. Новые технологические процессы могут быть использованы на предприятиях ракетно-космического комплекса (при изготовлении гаммы разгонных блоков типа «ДМ», при модернизации конструкций космических кораблей «СОЮЗ» и «ПРОГРЕСС»), оборонной промышленности, самолетостроения, судостроения, приборостроения, строительства, энергетики, например, при изготовлении корпусов отсеков крылатых летательных аппаратов («Развитие оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на 2007-2010 годы и на период до 2015 года», Федеральное агентство по промышленности) и емкостей топлива, крыльев летательных аппаратов («Ориентированные фундаментальные исследования, связанные с созданием и использованием новых наукоемких космических технологий», Федеральное космическое агентство) и скоростных судов, головных обтекателей ракет, а также на предприятиях, изготавливающих товары народного потребления, например, форм для конфет и т.д. Особый интерес будут представлять предложенные технологические процессы при создании космических кораблей нового поколения: «Клипер», «Паром», «Буксир», развитии МКС и др. Технологические процессы имеют двойное назначение.

Результаты планируемых научно-исследовательских работ могут быть использованы при выполнении прикладных НИР по широкому внедрению результатов исследований для производства деталей и узлов оборонной техники и летательных аппаратов, судостроения, транспортного машиностроения, а также товаров народного потребления. Результаты НИР могут быть востребованы ФГУП «ГНПП «Сплав» (г. Тула); ФГУП «ГНПП «ТЕХНО-МАШ» (г. Москва); ЗАО «Завод экспериментального машиностроения ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королева» (г. Королев Московской обл.); ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение» (г. Королев Московской обл.); ФГУП «НПО машиностроения» (г. Реутов Московской обл.); ФГУП «Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина» (г. Химки Московской обл.); ГНП РКЦ «ЦСКБ - Прогресс» (г. Самара); ФГУП «ГНПП Красноярский машиностроительный завод» и т.д.

Отдельные результаты исследований будут использованы при модернизации учебных планов подготовки бакалавров техники и технологии направления 150700 «Машиностроение» и магистров по направлениям подготовки 150400 «Технологические машины и оборудование», а также в учебном процессе в курсах «Теория обработки металлов давлением», «Специальные технологические процессы холодной обработки металлов давлением» и «Штамповка анизотропных материалов» при подготовке бакалавров техники и технологии направления 150700 «Машиностроение» профиль «Машины и технология обработки металлов давлением» и студентов, обучающихся по направлению 150200 «Машиностроительные технологии и оборудование»

специальности 150201 «Машины и технология обработки металлов давлением», при выполнении курсовых работ и дипломных проектов, а также учебных планов подготовки магистров по направлениям подготовки 150400 «Технологические машины и оборудование», при выполнении курсовых работ и дипломных проектов.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение.....</b>	<b>15</b>
<b>1 Научно обоснованные технологические решения изготовления крупногабаритных осесимметричных деталей с фланцем многооперационной вытяжкой полусферических днищ применительно к изготовлению деталей и узлов ракетно-космической техники.....</b>	<b>18</b>
<b>2 Технологические процессы холодной штамповки крупногабаритных полусферических тонкостенных днищ из кристаллических материалов различных типоразмеров</b>	<b>22</b>
<b>3 Технологические принципы разработки новых наукоемких технологических процессов изготовления крупногабаритных тонкостенных полусферических днищ из высокопрочных кристаллических материалов.....</b>	<b>36</b>
<b>4 Наукоемкий технологический процесс холодной штамповки осесимметричных деталей из алюминиевого сплава А5М.....</b>	<b>42</b>
<b>5 Научно обоснованные технологические решения изготовления крупногабаритных полуторовых днищ реверсивной вытяжкой применительно к изготовлению деталей и узлов ракетно-космической техники.....</b>	<b>46</b>
<b>6 Технологический процесс штамповки полуторовых днищ различных типоразмеров из тонколистового алюминиевого сплава АМгб.....</b>	<b>49</b>
<b>7 Техничко-экономическая оценка полученных результатов</b>	<b>54</b>
<b>8 Использование результатов научно-исследовательской работы в учебном процессе.....</b>	<b>56</b>
<b>9 Программа внедрения результатов НИР в образовательный процесс.....</b>	<b>58</b>
<b>10 Сведения о выполнении целевых индикаторов и показателей федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы» за 2010 г.....</b>	<b>66</b>
10.1. Список монографий, опубликованных в 2010 г.....	66
10.2. Список учебных пособий, опубликованных в 2010 г.....	66
10.3. Список научно-методических статей, опубликованных в 2010 г.....	67
10.4. Список статей, опубликованных в ведущих научных журналах в 2010 г.....	67
10.5. Список статей, опубликованных в межвузовских сборниках научных трудов в 2010 г.....	72
10.6. Список статей, опубликованных в международных сборниках научных трудов в 2010 г.....	74

10.7.	Список тезисов докладов, опубликованных в 2010 г.....	76
10.8.	Список, поданных заявок на изобретение в 2010 г.....	76
10.9.	Список защит кандидатских диссертаций в 2010 г.....	76
10.10.	Список защит докторских диссертаций в 2010 г.....	77
10.11.	Признание заслуг коллектива.....	77
<b>11</b>	<b>Сведения о выполнении целевых индикаторов и показателей федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы» за 2011 г.....</b>	<b>79</b>
11.1.	Список монографий, опубликованных в 2011 г.....	79
11.2.	Список учебных пособий, опубликованных в 2011 г.....	79
11.3.	Список учебно-методических статей, опубликованных в 2011 г.....	79
11.4.	Список статей, опубликованных в ведущих научных журналах в 2011 г.....	80
11.5.	Список статей, опубликованных в межвузовских сборниках научных трудов в 2011 г.....	86
11.6.	Список тезисов докладов, опубликованных в 2011 г.....	87
11.7.	Список, поданных заявок на изобретение в 2011 г.....	87
11.8.	Список защит докторских диссертаций в 2011 г.....	88
11.9.	Список защит кандидатских диссертаций в 2011 г.....	88
11.10.	Признание заслуг коллектива.....	89
<b>12</b>	<b>Сведения о выполнении целевых индикаторов и показателей федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы» за 2012 г.....</b>	<b>90</b>
12.1.	Список монографий, опубликованных в 2012 г.....	90
12.2.	Список учебных пособий, опубликованных в 2012 г.....	90
12.3.	Список научно-методических статей, опубликованных в 2012 г.....	90
12.4.	Список статей, опубликованных в ведущих научных журналах в 2012 г.....	91
12.5.	Список статей, опубликованных в межвузовских сборниках научных трудов в 2012 г.....	98
12.6.	Список статей, опубликованных в международных сборниках научных трудов в 2012 г.....	100
12.7.	Список тезисов докладов, опубликованных в 2012 г.....	101
12.8.	Список, поданных заявок на изобретение в 2012 г.....	103
12.9.	Список защит докторских диссертаций в 2012 г.....	103
12.10.	Список защит кандидатских диссертаций в 2012 г.....	103
12.11.	Признание заслуг коллектива.....	104
13.	Достижение Программных индикаторов и показателей.....	106
	<b>Заключение.....</b>	<b>110</b>

<b>Список используемых источников.....</b>	<b>114</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Конспект лекций по курсу «Физические основы пластической деформации» в виде новых лекций.....</b>	<b>121</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Методические указания по выполнению лабораторных работ по курсу «Теория обработки металлов давлением».....</b>	<b>180</b>

## Введение

Важной проблемой, стоящей перед современным машиностроением, является повышение эффективности и конкурентоспособности процессов изготовления изделий из металлов и сплавов методами обработки давлением, обеспечивающими необходимые эксплуатационные характеристики. Это актуально и для ракетно-космической техники, и для других отраслей промышленности.

Типовыми конструкциями изделий этих производств являются корпусные оболочки из листовых заготовок (оболочки емкостей, корпусные детали, сосуды высокого давления, днища баков, полуторы и т.д.). Эти конструкции требуют применения высокопрочных материалов, но трудоемких в обработке. К таким материалам относятся специальные титановые и высокопрочные алюминиевые сплавы. Для изготовления тонкостенных днищ баков и полуторы обычно используют многооперационную ступенчатую вытяжку в сочетании с реверсивной вытяжкой.

Качество обработки влияет на тактико-технические характеристики изделий и их надежность. Трудоемкость производства в настоящее время велика и составляет 70...80 % общей трудоемкости изделия. При этом требуется парк оборудования различного назначения: прессования, сварки, электроэрозионной и механической обработки, сборки стapelей и др.

Методы технологической обработки на базе резания, сварки, соединения клепкой, сваркой, пайкой не всегда обеспечивают требуемый уровень качества, которое определяется удельной прочностью изделий, точностью геометрии форм, герметичностью, коррозионной стойкостью, уровнем повреждаемости материала на стадиях обработки. При этом не маловажны расход основных материалов и трудоемкость производства [20-22, 23, 69].

В различных отраслях машиностроения, в частности наземном оборудовании ракетно-космической техники, широкое распространение нашли толстостенные осесимметричные детали, имеющие внутренние полости, изготавливаемые вытяжкой и вытравкой с утонением стенки из листовых заготовок, а также операцией обратного выдавливания трубных заготовок.

Прокат, используемый для процессов холодного деформирования, как правило, обладает анизотропией механических свойств, которая зависит от физико-химического состава сплава, технологии его получения и температуры обработки. Анизотропия механических свойств заготовки оказывает существенное влияние на силовые, деформационные параметры процессов обработки металлов давлением, на качество получаемых изделий [3, 4, 5, 10, 11, 19, 24, 34, 39, 43, 45, 46, 49, 50].

Технологические режимы пластического деформирования определяют степень формообразования, влияют на устойчивость деформаций, развитие несплошности материала и возможное разрушение. Они формируют качество изделий, что связано с анизотропией механических свойств, упрочнением материала, локальной потерей устойчивости заготовки и т.д. В этой связи научное обоснование технологических решений изготовления крупногабаритных осесимметричных деталей ответственного назначения методами пластического формоизменения на основе развития теории деформирования листовых и трубных заготовок, учитывающих анизотропию механических свойств, упрочнение материала заготовки, термомеханические режимы формоизменения и другие особенности процессов обработки металлов давлением, является крупной научно-технической проблемой большого народно-хозяйственного значения.

Цель выполнения научно-исследовательской работы - научное обоснование и внедрение высоких технологий изготовления корпусных деталей

сложной формы (полусферических и полуторовых днищ) ответственного назначения из высокопрочных кристаллических материалов методами пластического формообразования путем повышения пластической деформируемости листовых кристаллических материалов на базе изменения кристаллографической текстуры и характеристик анизотропии механических свойств, путем совершенствования технологий формообразования и термообработки при изготовлении. Подготовка научных кадров для машиностроительных предприятий и научно-исследовательских учреждений центрального региона и научно-педагогических кадров для высших учебных заведений, формирование эффективных и жизнеспособных научных коллективов.

# **1. Научно обоснованные технологические решения изготовления крупногабаритных осесимметричных деталей с фланцем многооперационной вытяжкой полусферических днищ применительно к изготовлению деталей и узлов ракетно-космической техники**

Качественная штамповка тонкостенных полусферических и торовых днищ с минимальным утонением и отсутствием гофр представляет весьма сложную технологическую проблему. Для изготовления тонкостенных полусферических днищ, как правило, применяют реверсивный метод штамповки [20, 23, 69]. Однако этот метод имеет существенные недостатки вследствие значительного утонения стенки днища, наличия гофр и высокого процента брака по разрывам.

Высокие требования надежности и массы конструкций обусловили необходимость поиска и разработки новых методов штамповки сферических и торовых днищ.

Внедрен и апробирован в производстве метод штамповки тонкостенных (1...4 мм) сферических днищ с применением ступенчатого набора металла на универсальных гидравлических прессах.

Сущность метода ступенчатого набора состоит в следующем:

1 Для устранения утонения стенок применяется предварительный набор металла в штампах, выполняемых с обязательным обеспечением степеней вытяжки (коэффициента вытяжки), свойственных штампуемому металлу.

2 Устранение радиального гофрообразования происходит путем применения каскада цилиндрических ступеней набора металла, по геометрии близкого к контуру вписанного радиуса днища.

3 В предварительных операциях набор металла осуществляется не полностью: для сферических днищ - около 95 %, для торовых - около 90 % расчетной заготовки. Недостающее количество металла в наборе восполняется в

процессе окончательной вытяжки дотяжкой из фланца. Для набора разработаны универсальные сборные переналаживаемые штампы (УСПШ). Придание штампам универсальности, для набора металла по переходам, достигается путем расчета и выбора размеров диаметров ступеней по минимальным степеням вытяжки, марок материалов, подлежащих штамповке. Зазоры между матрицей и пуансоном устанавливаются по максимальным толщинам днищ, подлежащих изготовлению. Колебание возможных зазоров в диапазоне 1...3 мм сверх штампуемых толщин для предварительных операций существенного влияния на качество штамповки не оказывает.

Располагая достаточным комплектом универсальных переналаживаемых штампов, при запуске в производство новых типоразмеров днищ необходимо в каждом конкретном случае изготовление только одного штампа для окончательной вытяжки, а при применении методов беспрессовой окончательной формовки и калибровки, например взрывом, - только одной матрицы с прижимом.

Расчет диаметра исходной заготовки производится по известным формулам [2, 8, 14, 15, 25, 38, 68, 70].

Для полусферических днищ с обрезом торца по центру сферы (без цилиндрического участка) с достаточной практической точностью расчет можно производить по эмпирической формуле

$$D_3 = 1,5...1,6D_0,$$

где  $D_3$  - диаметр исходной заготовки;  $D_0$  - диаметр сферического днища.

Построение переходов ступенчатого набора для полусферических днищ производится графоаналитическим способом с таким расчетом, чтобы максимальное количество ступеней переходов касалось контура окончательного (сферического) пуансона, а наибольший диаметр ступеней  $D_2$  вписывался в контур матрицы (рисунок 1.1).

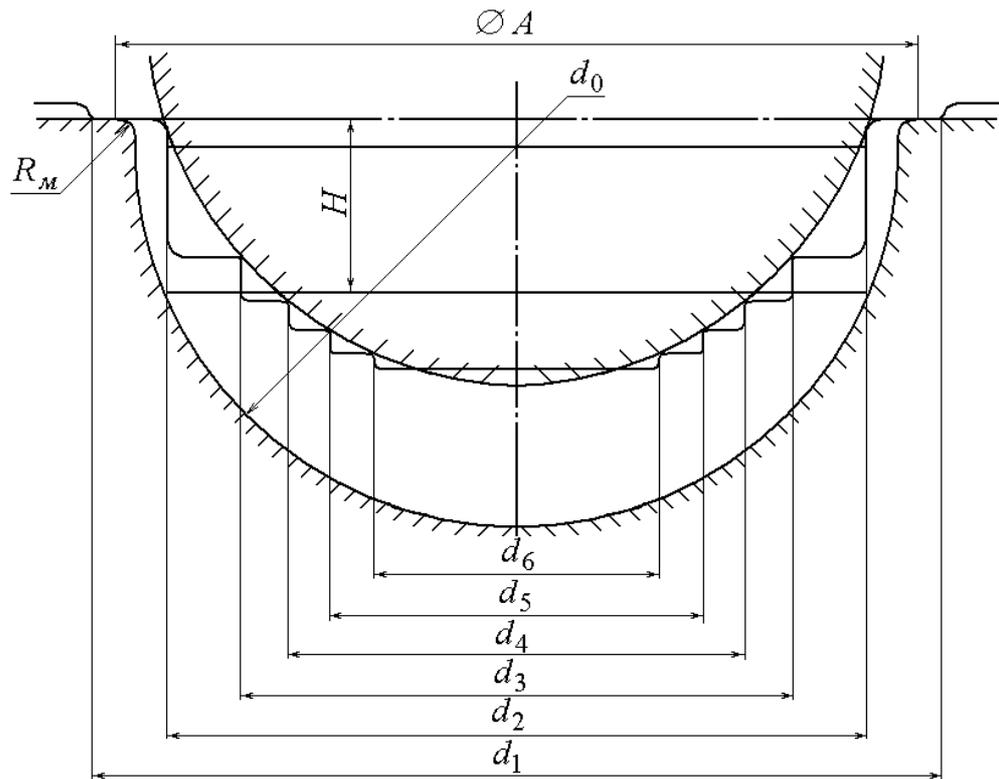


Рисунок 1.1 - Построение переходов ступенчатого набора для полусферических днищ

Имея достаточный набор элементов УСПШ, выполненный с коэффициентом около  $K_d = 1/m_d = 1,25$ , можем записать:

$$\frac{D_{\text{çãã}}}{d_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{d_2}{d_3} = \frac{d_3}{d_4} = \frac{d_4}{d_5} = \frac{d_5}{d_6} = 1,25.$$

Расчет высоты набора  $H$  (диаметра вписываемого в матрицу  $d_2$  (см. рисунок 7.1) производится обязательно аналитически по площади требуемого набора металла  $F_1$  в зоне, ограниченной диаметром  $d$ .

Таким образом, площадь набора металла должна быть несколько меньше расчетной площади для образования днища, а именно:  $F_1 = 0,95F$  - для сферического днища;  $F_1 = 0,90F$  - для торового днища, где  $F$  - расчетная площадь днища с фланцем, ограниченным диаметром  $A$ .

Последующие высоты ступеней с достаточной практической точностью можно принимать графически по построению как пересечение рабочих диаметров УСПШ с контуром сферического пуансона.

Высоту последнего набора рекомендуется принимать минимальной, равной не более величины радиуса матрицы.

Для этой цели в масштабе наносится сетка диаметров универсальных вытяжных штампов, и на этой сетке в том же масштабе вычерчивается контур полусферического днища. Количество переходов (ступеней) будет зависеть от:

- а) степени вытяжки, принятой для универсальных штампов;
- б) размеров полусферических днищ.

Кроме того, конструкция разъемной матрицы облегчает решение вопроса выталкивания днища из матрицы.

Прессовая калибровка с обтяжкой по оправке предпочтительней. Заслуживает внимания опыт одного из предприятий, который позаимствовал наш метод ступенчатого набора и конструкцию штамповой оснастки дополнил электрообогревом путем монтажа тэнов в прижимах и кольцах матриц и успешно освоил штамповку полусферических днищ диаметром около 800 и 1000 мм, толщиной 1,5...2 мм из магниевого сплава МА2-1. Нагрев заготовки осуществляется теплом рабочих элементов штампов (с регламентированной выдержкой) контактным способом.

Применение метода ступенчатого набора металла дает основание сделать следующий обобщенный вывод:

1 Ступенчатый набор металла является универсальным методом, имеющим значительные преимущества перед другими, и применим в широком диапазоне технических требований.

2 Ступенчатый набор устраняет радиальное гофрообразование при относительных толщинах 0,003...0,001 и менее, неизбежное при иных известных методах штамповки.

3 Применение ступенчатого набора значительно уменьшает утонение исходной толщины заготовки, а в некоторых случаях полностью устраняет его на средне- и высокопрочных сталях типа ЭИ-811, ЭИ-678 и др.

4 Применение универсальных переналаживаемых штампов, для пред-

варительного набора, с перепадом диаметров по минимальным степеням вытяжки, позволяет:

а) штамповать в холодном состоянии тонколистовые, высокопрочные и труднодеформируемые сплавы, в том числе титановые;

б) в ряде случаев сократить количество межоперационных отжигов;

в) производить операции по набору металла в значительном диапазоне типоразмеров сферических и эллиптических днищ, конических и цилиндрических деталей;

г) значительно сократить сроки технической подготовки производства при запуске новых изделий, так как при этом необходимо изготовление только одного окончательно формирующего штампа;

д) впервые в практике качественно изготавливать тонкостенные цельноштампованные днища с относительной толщиной до 0,001...0,0005.

5 Изложенный метод штамповки днищ с применением универсальных переналаживаемых штампов в значительной мере отвечает возросшим требованиям надежности конструкции и массы, а также снижению трудозатрат на изготовление командных узлов изделий.

Силовые режимы и предельные возможности формоизменения многооперационной ступенчатой вытяжки без утонения стенки осесимметричных деталей из анизотропных материалов определяются по разработанному пакету прикладных программ на ЭВМ [30, 33, 51, 52, 53-59, 64-67, 69].

Таким образом, для осуществления ступенчатого набора металла при вытяжке тонколистовых осесимметричных деталей было создано несколько штамповых блоков со сменными элементами УСПШ, рабочих диаметров от 3080 до 22 мм. УСПШ применяются на гидропрессах силой 10; 6,3; 2,5; 1,6; 1,0 МН и механическом прессе 3,15 МН.

## 2. Технологические процессы холодной штамповки крупногабаритных полусферических тонкостенных днищ из кристаллических материалов различных типоразмеров

В космической технике для хранения топлива широко используются баки сферической формы, изготавливаемые из двух отштампованных полусфер сваркой встык.

Основными критериями при выборе материала для бака являются запас прочности, долговечность и малая масса. Установлено, что по сравнению с алюминиевыми баками, баки, изготавливаемые из титановых сплавов, при прочих равных качественных показателях будут иметь более низкую массу, а следовательно, более выгодны.

Новый титановый сплав ПТ-3Вкт содержит в своем составе следующие легирующие элементы в % массы:

Al	V	C	N <sub>2</sub>	Fe	Si	O <sub>2</sub>
3,8	1,4	0,08	0,04	0,07	0,02	0,13

Поскольку отштампованные полусферические днища в дальнейшем проходят операцию химического фрезерования, для облегчения конструкции и из-за особых условий работы изделий высокие требования предъявляются к результирующему утонению отштампованных днищ. Оно не должно быть меньше 0,9 толщины исходного материала  $s_0$ .

Кроме того, титановые сплавы имеют существенно меньшую теплопроводность по сравнению с алюминиевыми, что не маловажно для криогенных баков, они не требуют проведения специальных мероприятий по защите от коррозии и более пригодны для многократного использования.

Для хранения больших запасов горючего при давлении, не превышающем 6 МПа, используют сферические баки в интервале диаметров 1000 мм  $< D_{сф} < 2000$  мм с рассчитанным из условий прочности соотношением  $s_0/D_{сф} < 0,003$ .

Известен способ штамповки днищ с предварительным ступенчатым набором и последующей калибровкой на мощных гидравлических прессах или установках для беспрессовой штамповки с использованием импульсных энергоносителей [1, 20, 23, 69].

Недостатком этого способа является тот факт, что фланец, получаемый на первом переходе предварительной вытяжки, остается без изменений до окончательной калибровки и является также фланцем требуемого полусферического полуфабриката, а весь предварительный набор осуществляют за счет перераспределения металла без участия в нем фланца. При этом диаметр первого перехода  $D_1$  меньше диаметра полусферы [29, 69], ибо в противном случае ступенчатая заготовка не вписалась бы в калибровочную матрицу, повторяющую контур заготовки и, следовательно, коэффициент вытяжки первого перехода, в отличие от коэффициентов вытяжки последующих переходов в среднем равных 0,8 составил бы

$$m_d = \frac{D_1}{D_{заг}} \approx \frac{0,9D_{сф.}}{1,6D_{сф.}} \approx 0,56,$$

что делает невозможным использование метода при штамповке полусфер из титановых сплавов. Способ не дает также такую форму ступенчатого набора, которая обеспечила бы снижение широтных деформаций растяжения и исключила бы гофрообразование при калибровке, т.к. не содержит указаний, на какую высоту производить вытяжку в каждом переходе предварительного ступенчатого набора. Из опыта известно [10, 13, 15, 16, 20, 27, 28, 38, 69], что гофры, возникающие при штамповке титановых сплавов, не устраняются ни последующей калибровкой взрывом, ни калибровкой в горячую, а увеличение деформаций растяжения, не достигающих критической величины при калибровке более пластичных металлов, приводит к разрывам при штамповке.

Указанным методом из металлов, имеющих уменьшенную или низкую штампуемость, каким и являются титановые сплавы, качественную полусферу с соотношением  $s_0/D_{сф} < 0,003$  в холодную получить невозможно.

Задачей является повышение качества крупногабаритных ( $1000 \text{ мм} < D_{сф} < 2000 \text{ мм}$ ) полусферических днищ титановых баков с соотношением толщины стенки  $s_0$  к диаметру днища  $D_{сф}$  меньше 0,003.

Поставленная задача решается путем многопереходной ступенчатой вытяжки цилиндрических стаканов с промежуточными отжигами и последующей калибровкой импульсным нагружением с образованием изделия требуемой формы, причем на первом переходе вытяжки получают цилиндрический стакан без фланца с диаметром  $d_1$ , равным от  $1,15 D_{сф}$  до  $1,25 D_{сф}$  [1, 29, 69]. На втором переходе формируют фланец, а вытяжку цилиндрической части стакана производят до момента появления отклонения цилиндрической стенки, полученной на первом переходе, от исходного положения. На третьем переходе вытягивают полуфабрикат с высотой, равной от 0,9 до 0,95  $z$  ( $z$  - расстояние между плоскостью фланца, обращенной к цилиндрической части, и плоскостью, параллельной фланцу, и проведенной через линию пересечения проекции контура готового днища и цилиндрической стенки полуфабриката второго перехода), а на каждом следующем переходе вытяжку производят до полного переформовывания цилиндрической стенки, полученной на предыдущем переходе, в цилиндрическую стенку с меньшим диаметром.

Последовательность операций поясняется рисунками 2.1 – 2.8.

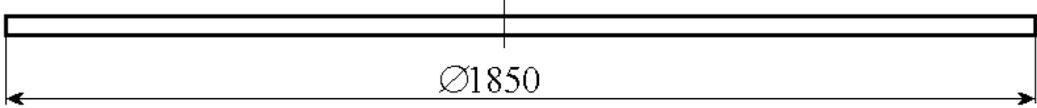
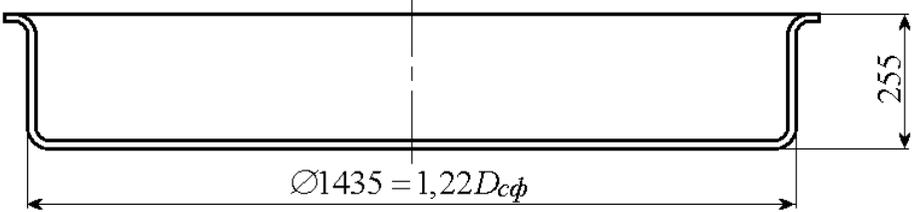
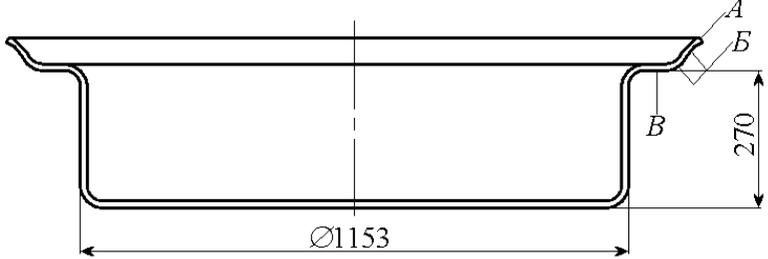
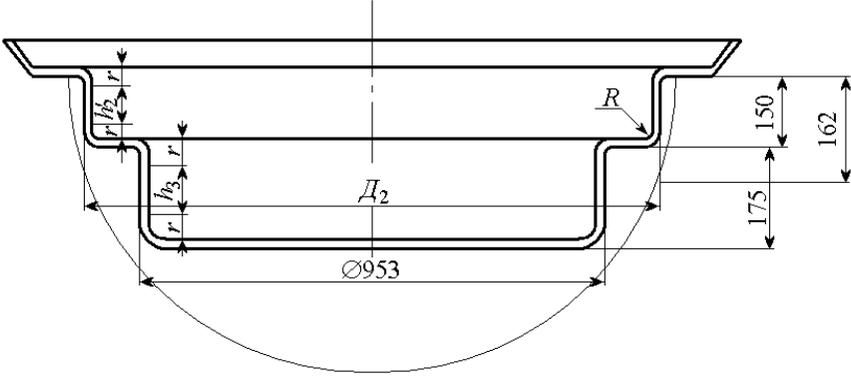
На рисунках 2.2 и 2.3 изображена исходная листовая заготовка и детали после первой операции вытяжки; на рисунках 2.4 – 2.8 показаны вытяжные переходы соответственно с I по VI; на рисунке 2.9 изображен полуфабрикат после калибровки обтяжкой; на рисунке 2.10 представлена схема II перехода вытяжки, где номерами позиций 1, 2 и 3 обозначены соответственно матрица, прижим и пуансон; на рисунке 2.11 - схема V перехода вытяжки.

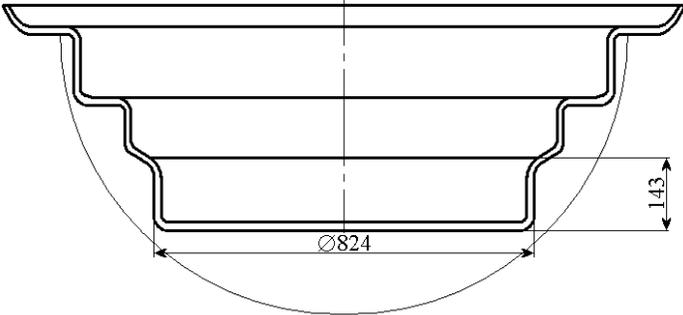
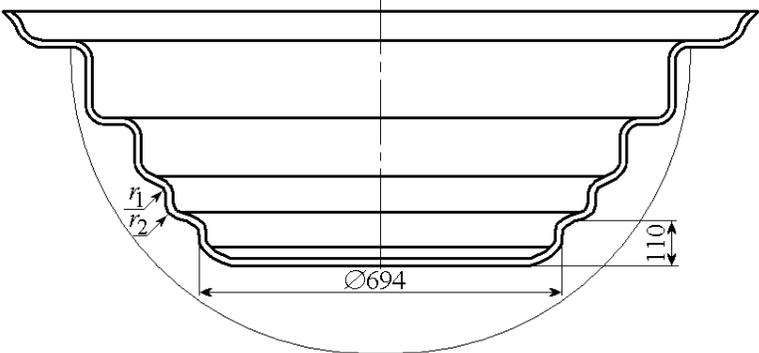
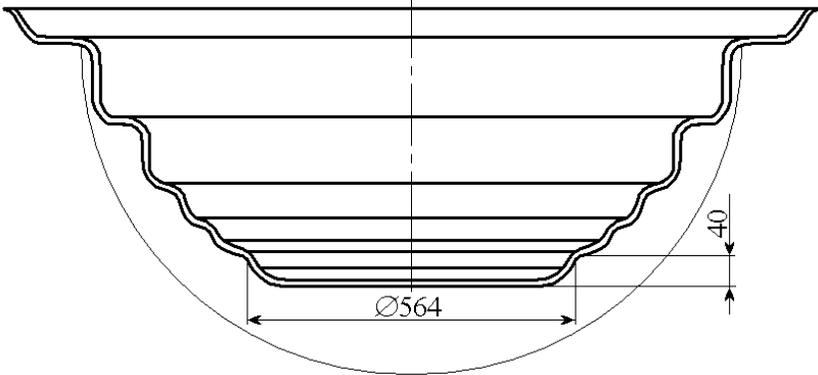
Следует отметить, что во втором переходе вытяжка прекращается в момент, когда кромка заготовки под действием изгибающего момента на входе  $A$  под радиусный прижим отклоняется с увеличением диаметра (см. рисунок 2.1).

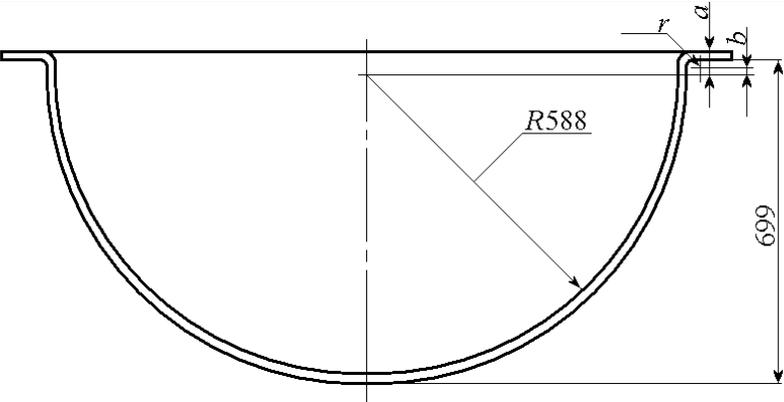
При продолжении процесса вытяжки уменьшается диаметр кромки  $A$  при втягивании ее под прижим 2, что приведет к появлению гофр и затем трещин на свободном (не под прижимом) участке фланца  $B$ . Опытным путем установлено, что при диаметре первого перехода меньше  $1,15 D_{сф}$  усиливается тенденция к гофрообразованию под радиусным прижимом второго перехода, поскольку уменьшается плоский участок  $B$ , а при диаметре первого перехода ( $d_1$ ) больше  $1,25 D_{сф}$  количество втянутого в матрицу металла будет недостаточно для последующего набора.

В третьем переходе штамповка ведется с радиусным прижимом по дну цилиндра второго перехода. Перетяжка стенки второго в стенку третьего перехода прекращается в тот момент, когда высота оставшейся стенки второго перехода будет составлять  $(0,9...0,95)z$ , где  $z$  - расстояние между плоскостью фланца, обращенной к цилиндрической части, и плоскостью, параллельной фланцу, и проведенной через линию пересечения проекции контура готового днища и цилиндрической стенки полуфабриката второго перехода (см. рисунок 2.4). Установлено, что в случае, если эта высота будет больше  $0,95 z$ , наружный радиус второго перехода  $R$  будет лежать настолько близко к дну калибровочной матрицы, что в начале процесса калибровки упрутся в дно матрицы и затруднит скольжение и обтяжку материала по пуансону, что вызовет смятие ступени и вследствие этого гофрообразование. Уменьшение высоты оставшейся стенки второго перевода приведет к увеличению широтных деформаций растяжения при калибровке на внутреннем радиусе  $D$  второй ступени и повышению вероятности разрывов при калибровке в холодную.

Таблица 2.1 - Эскизы полуфабрикатов

Название	Номер рисунка.	Эскизы полуфабрикатов
Заготовка. Отжиг при $T = 600^{\circ}C$ в течении 1 часа	2.1	
Полуфабрикат I перехода вытяжки. Отжиг при $T = 600^{\circ}C$ в течении 1 часа	2.2	
Полуфабрикат II перехода вытяжки. Отжиг при $T = 600^{\circ}C$ в течении 1 часа	2.3	
Полуфабрикат III пе- рехода вытяжки	2.4	

Название	Номер рисунка	Эскизы полуфабрикатов
Полуфабрикат <i>IV</i> перехода вытяжки	2.5	
Полуфабрикат <i>V</i> перехода вытяжки	2.6	
Полуфабрикат <i>VI</i> перехода вытяжки Отжиг при $T = 600^{\circ}C$ в течении 1 часа	2.7	

Название	Номер рисунка	Эскизы полуфабрикатов
Полуфабрикат после калибровки обтяжкой	2.8	 <p>The drawing shows a semi-circular metal blank. A vertical dashed line indicates the center of the semi-circle. The radius of the semi-circle is labeled as <math>R588</math>. The total height of the blank is indicated by a vertical dimension line on the right, labeled as 699. At the top right corner, there are two small rectangular features. The first is a thin layer with a thickness labeled <math>a</math>. The second is a slightly thicker layer with a thickness labeled <math>b</math>. A small radius <math>r</math> is also indicated at the top right corner, likely for the fillet of the blank.</p>

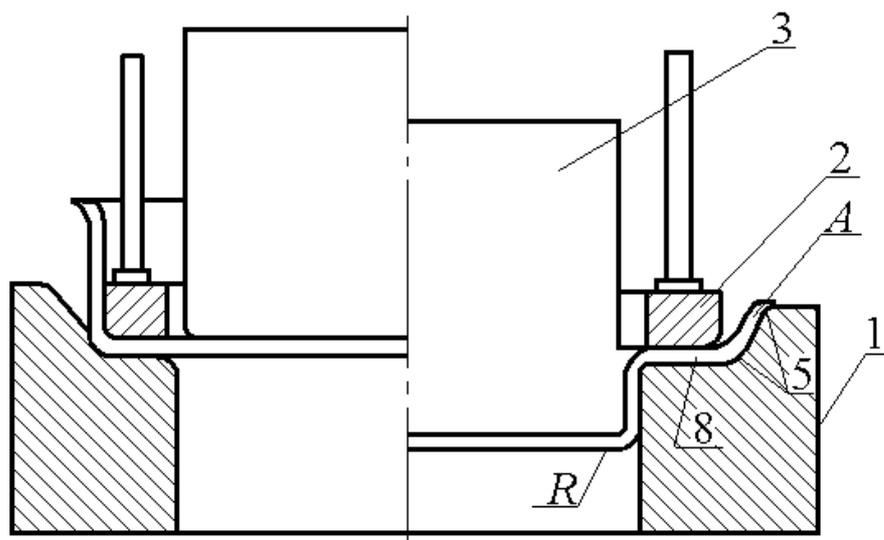


Рисунок 2.9 - Схема II перехода вытяжки: 1 – матрица; 2 – прижим; 3 – пуансон

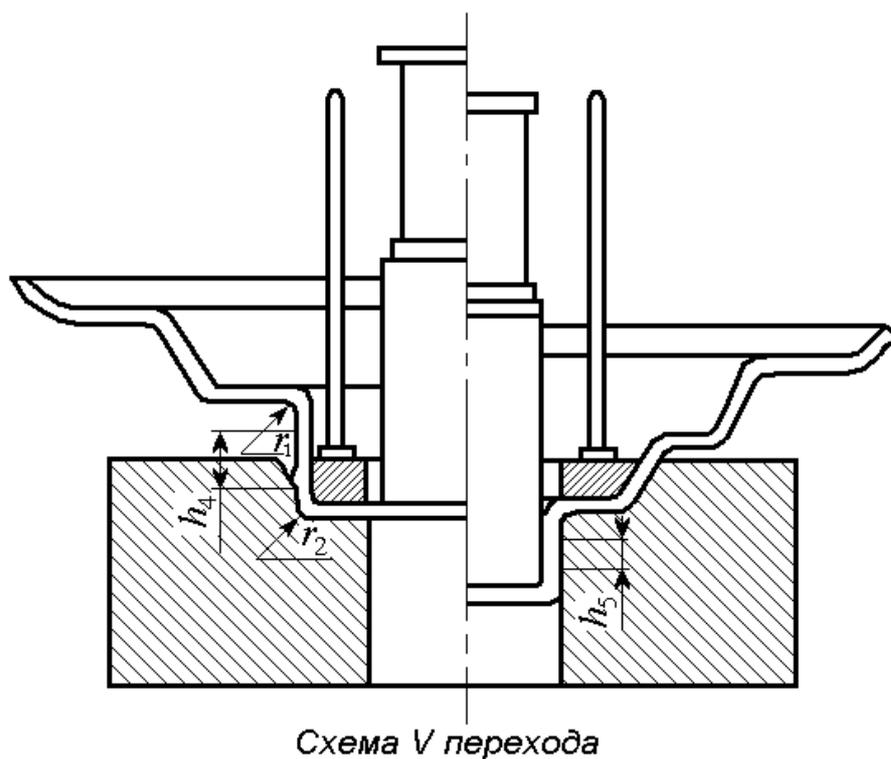


Схема V перехода

Рисунок 2.10 - Схема V перехода вытяжки

Экспериментально установлено, что если высота оставшейся части по диаметру второго перехода лежит в интервале  $(0,95...0,9) z$  при калибровке в холодную, то не происходит гофрообразования и мала вероятность разрывов. В оставшихся пере-

ходах ступенчатого набора максимальное приближение ступенчатого контура к полусфере, что равнозначно для оставшихся переходов максимальному углублению ступеней, достигают тем, что вытяжку очередного перехода ведут до тех пор, пока цилиндрический участок стенки предыдущего перехода полностью не перетянется в стенку последующего так, что верхний выпуклый  $r_1$  и нижний вогнутый  $r_2$  радиусы перетягиваемой стенки начнут сопрягаться (см. рисунок 2.6). При этом высота цилиндрического участка каждой новой вытянутой стенки получается меньшей, чем у предыдущей, и через 2...3 перехода цилиндрический участок полностью исчезает. На этом процесс получения ступенчатого полуфабриката считается законченным, а калибровку производят пуансоном в глухую матрицу с прижимом фланца, а окончательную калибровку - взрывом.

Ниже описан один из возможных вариантов изготовления тонкостенного полусферического днища из титанового листа диаметром  $1176 \pm 0,5$  мм, толщиной  $s_0 = 3,5$  мм, с отношением  $\frac{s_0}{D_{сф}} = \frac{3,5}{1176} = 0,0022$ , внедренный на ЗАО «ЗЭМ РКК «Энергия» имени С.П. Королева». Материал – титановый сплав ПТ-3Вкт ( $\sigma_{\sigma} = 820...860$  МПа;  $\sigma_s = 700...780$  МПа).

Способ осуществляется в следующей последовательности:

1 Раскрой листов на карты.

2 Разметка и вырезка заготовок диаметром 1850 мм (см. рисунок 2.1).

3 Отжиг при температуре  $650$  °С в течение 1 ч с последующим охлаждением активным воздухом в течение 2 ч.

4 Вытяжка заготовки диаметром  $D_1 = 1435$  мм в штампе первого перехода  $D_1 = 1,22 D_{сф}$ . Сила прижима  $P_{пр} = 1850$  кН. Вытяжка прекращается, когда фланец выходит из-под прижима, высота  $H = 255$  мм (см. рисунок 2.2).

5 Отжиг при температуре  $T = 650$ °С в течение 1 ч с охлаждением активным воздухом в течение 2 ч.

6 Вытяжка заготовки диаметром  $D_2 = 1153$  мм в штампе второго перехода. Сила прижима  $P_{пр} = 1400$  кН. Вытяжка прекращается в момент отклонения кромки

$A$  (см. рисунок 2.3) с увеличением диаметра. Высота вытяжки  $H_2 = 270$  мм (см. рисунок 2.3).

7 Отжиг при  $T = 300^\circ\text{C}$  в течение 1 ч, охлаждение - активный воздух в течение 2 ч.

8 Вытяжка заготовки диаметром  $D_3 = 953$  мм в штампе третьего перехода (см. рисунок 2.4).

Высота вытяжки  $H_3$  равна высоте цилиндрического участка  $h_3$  и двух радиусных частей ( $r$  - радиуса матрицы и пуансона равны):

$$r = 40 \text{ мм}; \quad H_3 = h_3 + 2r.$$

Высоту вытяжки третьего перехода рассчитываем по формуле:

$$h_3 = \frac{h_2 - h'_2}{m_d} - 1,14r,$$

где  $h_2$  - высота цилиндрического участка стакана второго перехода до вытяжки;

$$h_2 = 270 - 2r = 170 \text{ мм}, \quad r = 50 \text{ мм}; \quad m_d = \frac{D_3}{D_2} = \frac{953}{1453} = 0,826;$$

$h'_2$  - высота цилиндрического участка оставшейся части стакана второго перехода, рассчитываемого из условия, что  $H'_2 = 0,95z$ , где

$Z = \sqrt{R_{\text{сф}}^2 - R_2^2} + a = \sqrt{582^2 - 576^2} + 50 = 162$  мм, где  $a$  - сумма высоты цилиндрического участка и (« $B$ ») припуска на дальнейшую механическую обработку (обрезку фланца):  $B = 10$  мм,  $a = 50$  мм (см. рисунок 2.1);  $z$  - высота вытяжки третьего перехода:

$$0,95z = 162 \cdot 0,95 = 154 \text{ мм} = H'_2; \quad h'_2 = H_2 - 2r = 74 \text{ мм};$$

$$h_3 = \frac{170 - 74}{0,824} - 1,14 \cdot 40 = 95 \text{ мм}; \quad H_3 = 95 + 80 = 175 \text{ мм}.$$

Таким образом, в третьем переходе вытяжка производится на глубину  $H_3 = 175$  мм. Сила прижима  $P_{\text{пр}} = 800$  кН. (см. рисунок 2.4).

9 Вытяжка заготовки диаметром  $D_4 = 824$  мм в штампе  $IV$  перехода. Поскольку все оставшиеся переходы ведут до полной перетяжки цилиндрического участка

предыдущего перехода, формула в общем виде для всех переходов, начиная с *IV* перехода, примет вид:  $h_i = \frac{h_i - 1}{m_{di}} - 1,14 r$ , поскольку  $h'_{i-1} = 0$  во всех последующих случаях, где  $h_i$  - высота цилиндрической стенки очередного перехода:

$$h_4 = \frac{95}{0,865} - 45,6 = 63 \text{ мм}; \quad r = r_i = r_i; \quad H_4 = h_4 + 2r = 143 \text{ мм},$$

т.е. вытяжку ведут на глубину  $H_4 = 143$  мм;  $P_{np} = 600$  кН (см. рисунок 2.5).

10 Вытяжка заготовки диаметром  $D_5 = 694$  мм в штампе *V* перехода. Вытяжку ведут на глубину  $H_5 = 110$  мм,  $P_{np} = 400$  кН (см. рисунок 2.6).

11. Вытяжка заготовки диаметром  $D_6 = 564$  мм в штампе *VI* перехода. Вытяжку ведут на глубину внедрения радиусной части  $H_6 = 40$  мм,  $P_{np} = 250$  кН (см. рисунок 2.7).

12. Отжиг при температуре  $T = 650^\circ\text{C}$  в течение часа, охлаждение на активном воздухе в течение 2 ч.

13. Калибровка обтяжкой по пуансону радиусом  $R = 588$  мм в матрицу  $R = 591,5$  мм (см. рисунок 2.8).

14. Калибровка взрывом по матрице с радиусом  $R = 591,5$  мм.

15. Разметка под химфрезерование.

16. Изоляция рабочих мест, не подлежащих химфрезерованию.

17. Химфрезерование наружной поверхности с 3,5 до 2,4 мм до заданных размеров с целью снижения массы.

18. Обрезка обля, подрезка торца и вырезка центрального отверстия под штуцер.

Технологический процесс реализован на гидравлическом прессе силой 10 МН (рисунок 2.11). Полусферические тонкостенные днища из листов титанового сплава ПТ-3Вкт представлены на рисунке 2.12.

Таким образом, предложенный новый технологический процесс позволил получить качественно новый метод обработки титанового сплава путем холодной многопереходной вытяжки.

В результате рационального построения ступенчатой вытяжки было получено качественное полусферическое титановое днище диаметром, лежащим в интервале  $1000\text{мм} < D_{сф} < 2000\text{мм}$  и  $S/D_{сф} < 0,003$ , что было невозможно сделать существующими способами холодной штамповки. Днище имеет утонение  $\frac{S_{дн}}{S_{заг}} \geq 0,9$ , чего бы не смогли добиться ни одним из существующих методов обработки давлением.



Рисунок 2.11 – Вид гидравлического пресса силой 10 МН



Рисунок 2.12 - Вид полусферических тонкостенных днищ из листов титанового сплава ПТ-3Вкт

При штамповке в холодную в универсальных штампах (матричных кольцах) нет необходимости в дорогостоящих штампах с обогревом, значительно повышается культура производства, снижается травматизм. Холодная штамповка более экономична с точки зрения энергозатрат. По сравнению с вариантом получения титановых полусферических днищ механической обработкой заготовок, полученных методом горячей объемной штамповки, способ позволяет снизить трудоемкость механической обработки с 20 смен до 2 часов.

### 3. Технологические принципы разработки новых наукоемких технологических процессов изготовления крупногабаритных тонкостенных полусферических днищ из высокопрочных кристаллических материалов

Автором разработано техническое решение, позволяющее повысить качество обработки при получении полусферических днищ с относительной толщиной стенки  $s/D$  меньше 0,3 % из малопластичных материалов путем разгрузки опасного участка в зоне контакта заготовки по радиусу закругления пуансона [29, 69].

Для осуществления предлагаемого способа при получении полусферического днища, показанного на рисунке 3.1 необходимо изготовить заготовку – кружок диаметром 1850 мм. Относительная толщина заготовки  $s/D=0,19$  %.

Материал – титановый сплав марки ПТ-3Вкт толщиной  $s=3,5$  мм имеющий следующие механические и пластические характеристики: предел прочности  $\sigma_g=860$  МПа, предел текучести  $\sigma_{0,2}=520$  МПа, относительное удлинение  $\delta=10$  %.

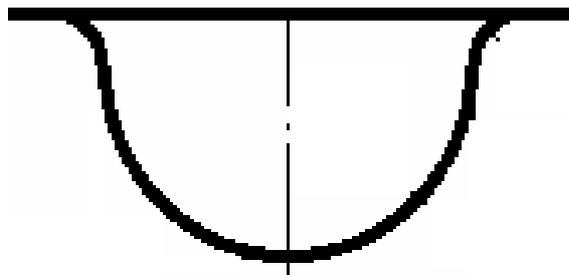


Рисунок 3.1 – Схема тонкостенного полусферического днища

При использовании такой заготовки для предотвращения складкообразования при формовке и вытяжке необходимо применять штампы с прижимом.

В предлагаемом способе для осуществления первой вытяжки при комнатной температуре с коэффициентом вытяжки 0,80 получится полуфабрикат диаметром 1435 мм. Для предотвращения отрыва донной части и уменьшения утонения в месте перехода дна в стенку перед вытяжкой на плоской заготовке изготавливают кольцевой выступ, диаметр вершины которого равен сумме диаметров полуфабриката первой вытяжки и радиуса кольцевого углубления, показанного на рисунке 3.2, а.

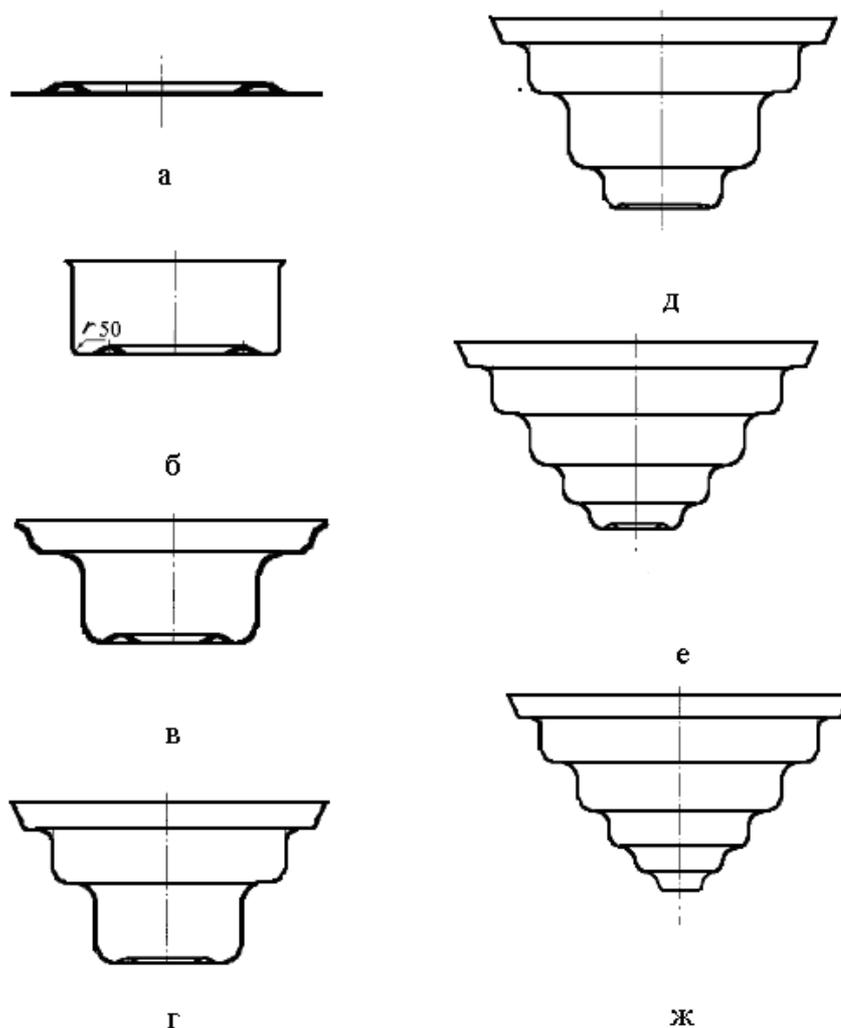


Рисунок 3.2 - Полуфабрикаты по переходам вытяжки, необходимые для получения многоступенчатой заготовки

Размеры кольцевого выступа на плоской заготовке зависят от разности диаметров заготовки и полуфабриката первой вытяжки (участка фланца). В рассматриваемом примере ширина фланца равна  $0,5(D_3 - d_1) = 0,5(1850 - 1428) = 211$  мм. Так как формообразование кольцевого выступа осуществляется с прижимом заготовки, то участок прижима примем по ширине равным 40 мм, а участок для тора - 171 мм. Малый радиус тора и его высота выступа равны  $1 \times 171/3,141 = 54,5$  мм. Диаметр вершины кольцевого выступа равен  $1428 + 54,5 = 1482,5$  мм. В процессе формовки кольцевого выступа уменьшится диаметр плоской заготовки. Места перехода кольцевого углубления в плоскость выполняются по радиусу закругления, соответствующие радиусу закругления на пуансоне вытяжки. На рисунке 3.2, а приведена плоская заготовка после формовки.

При вытяжке отформованная заготовка укладывается в штамп вершиной выступа в направлении прижима и осуществляется вытяжка. На начальном этапе вытяжки пуансон контактирует с кольцевым выступом по радиусу закругления, и одновременно подпружиненный прижим воздействует на вершину выступа, в результате чего начинается разглаживание. Процесс разглаживания кольцевого выступа подпружиненным прижимом будет создавать подпор в меридиональном направлении при ходе пуансона вытяжки на глубину  $h_{\Pi} = 54,5$  мм. Это снижает величину растягивающих напряжений в меридиональном направлении и существенно уменьшает утонение стенки в донной части полуфабриката, что предотвращает разрушение материала заготовки из малопластичного материала. На заключительном этапе вытяжки проводится формование кольцевого выступа в донной части полуфабриката, размеры радиуса поверхности  $r_m$  которого определяются в зависимости от диаметра полуфабриката первой и второй вытяжек по зависимости

$$r_{m_i} = 0,5 \cdot (d_i - d_{i+1}) \cdot 0,8 / \pi ,$$

где  $d_i$  и  $d_{i+1}$  – диаметры полуфабрикатов вытяжки на рассматриваемой и последующей операциях:

$$r_{m2} = 0,5 (1428 - 1150) 0,8 / 3,14 = 35 \text{ мм.}$$

Диаметр вершины кольцевого выступа в донной части

$$d_{e2} = 1250 + 35 = 1285 \text{ мм.}$$

На рисунке 3.2, в показан полуфабрикат второй вытяжки.

На последующих операциях изготавливается ступенчатый полуфабрикат с фланцем следующим образом. На второй операции формируют фланец, цилиндрическую часть стакана и формируют кольцевой выступ в донной части. На начальном этапе пуансон контактирует с кольцевым выступом, который охватывает поверхность пуансона по радиусу закругления, а подпружиненный прижим - с вершиной выступа. Происходит разглаживание выступа и создание подпора в меридиональном направлении по пути хода пуансона 35 мм, что приводит к уменьшению меридиональных растягивающих напряжений. На заключительном этапе в донной части полуфабриката формируется кольцевой выступ. Радиус кольцевого выступа

$$r_{m3} = 0,5 (1150 - 950) 0,8 / 3,14 = 25,5 \text{ мм.}$$

Диаметр вершины кольцевого выступа будет

$$d_{63} = 950 + 25,5 = 975,5 \text{ мм.}$$

На рисунке 3.2, г показан полуфабрикат третьей вытяжки. На третьей и последующих операциях процесс формоизменения осуществляется аналогично. При этом размеры кольцевого выступа будут следующими:

$$r_{m4} = 0,5 (950 - 824) 0,8 / 3,14 = 16 \text{ мм}; \quad d_{64} = 824 + 16 = 840 \text{ мм,}$$

ход подталкивания 16 мм;

$$r_{m5} = 0,5 (824 - 694) 0,8 / 3,14 = 16 \text{ мм}; \quad d_{65} = 694 + 16 = 710 \text{ мм,}$$

ход подталкивания 16 мм;

$$r_{m6} = 0,5 (694 - 564) 0,8 / 3,14 = 16 \text{ мм}; \quad d_{66} = 564 + 16 = 580 \text{ мм,}$$

ход подталкивания 16 мм.

Заключительную операцию вытяжки проводят без формования кольцевого выступа в донной части.

На рисунке 3.2, д показан полуфабрикат после четвертой вытяжки, на рисунке 3.2, е – пятой вытяжки, на рисунке 3.2, ж – шестой вытяжки.

Далее осуществляется калибровка ступенчатого полуфабриката для получения полусферического днища.

Для осуществления способа используются штампы. На рисунке 3.3 показан штамп для формования кольцевого выступа в плоской заготовке, в котором плоская заготовка укладывается на матрицу 1 для формовки и перед формовкой прижимается к ней подпружиненным прижимом 2.

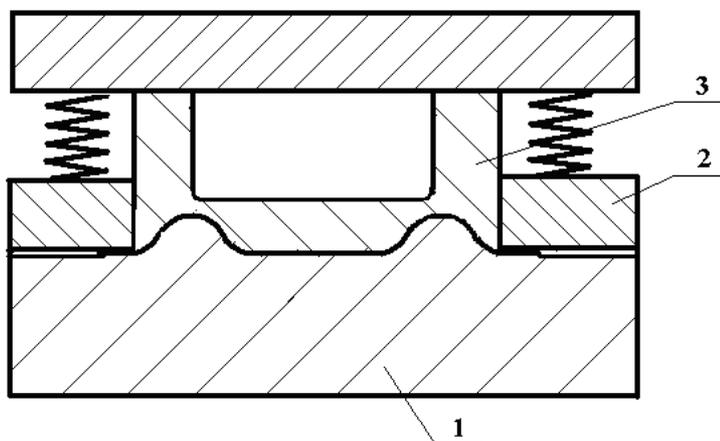


Рисунок 3.3 – Схема штампа для формовки тороидального кольцевого выступа в плоской заготовке

Затем осуществляется формовка тороидального кольцевого выступа пуансоном 3 и получается заготовка, показанная на рисунке 3.2, а.

В процессе формовки происходит радиальное перемещение края заготовки и уменьшается ее диаметр с 1850 до 1726 мм.

Последующие операции вытяжки и формовки осуществлялись в штампах для вытяжки и формовки, приведенных на рисунке 3.4.

Отформованная на первой операции заготовка укладывается на матрицу 1 вершиной кольцевого выступа в направлении подпружиненного прижима 2. При рабочем ходе с заготовкой одновременно контактируют пуансон вытяжки 3, который соприкасается по внутреннему обводу кольцевого выступа заготовки, и прижим 2, воздействующий на вершину выступающей части кольцевого выступа.

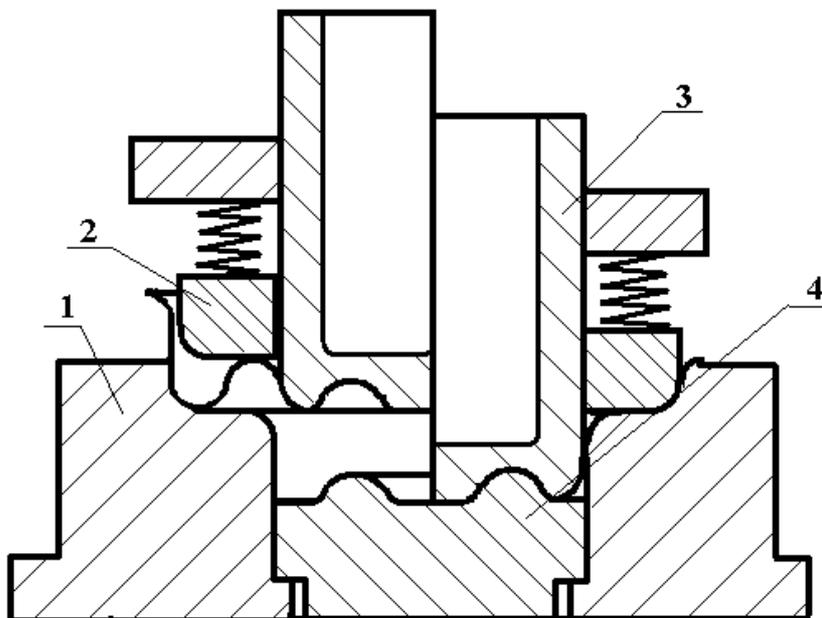


Рисунок 3.4. – Схема штампа для последующих переходов вытяжки-формовки

Происходит вытяжка с подталкиванием материала заготовки в меридиональном направлении в процессе разглаживания кольцевого выступа. В результате уменьшения изгибающих напряжений по радиусу закругления пуансона вытяжки путем образования кольцевого выступа, внутренний обвод которого с плоской по-

верхностью заготовки выполнен с радиусом закругления, равным радиусу закругления пуансона, а также наличия подпора в меридиональном направлении, существенно уменьшается утонение стенки заготовки и возможно формоизменение малопластичного материала. На заключительном этапе вытяжки происходит формирование кольцевого выступа с размерами, зависящими от разности диаметров полуфабрикатов данной и предстоящей операциях. Для этого на торце пуансона вытяжки изготавливается кольцевое углубление с размерами радиуса тора  $r_{m_i} = 0,5 \cdot (d_i - d_{i+1}) \cdot 0,8 / \pi$  и диаметром вершины кольцевого углубления  $d_e = d_{i+1} + r_{m_{i+1}}$ , а на поверхности выталкивателя – 4-й выступ, зеркально отображающий форму кольцевого углубления пуансона.

Предлагаемое техническое решение позволяет устранить брак из-за разрушения заготовки в опасном сечении, уменьшить колебание толщины стенки полусферических днищ, снизить трудоемкость доводочных операций, например химического фрезерования, и позволяет получать изделия из труднодеформируемых малопластичных материалов.

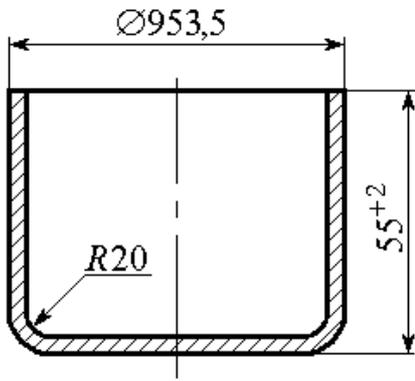
Предложенные технологические процессы многооперационной ступенчатой вытяжки приняты к внедрению в производство на ЗАО «ЗЭМ РКК «Энергия» имени С.П. Королева». Новые технологические процессы обеспечивают: увеличение удельной прочности в 1,5...1,7 раз; уменьшение массы в 1,5 раз; снижение трудоемкости в 2...3 раз; увеличение коэффициента использования материала с 0,3 до 0,9; сокращение сроков подготовки производства новых изделий в 2 раза.

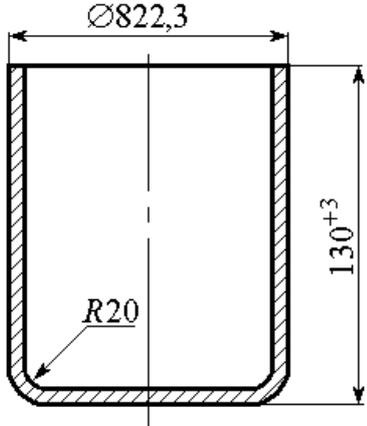
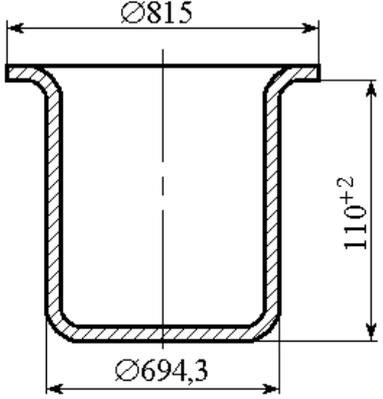
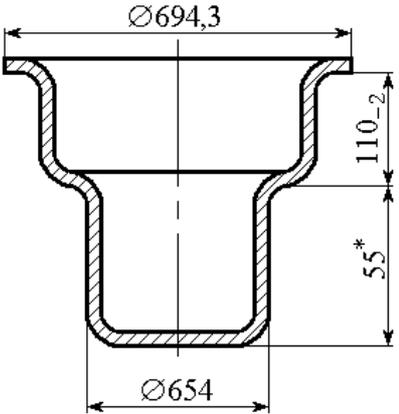
#### 4. Научно-технологический процесс холодной штамповки осесимметричных деталей из алюминиевого сплава А5М

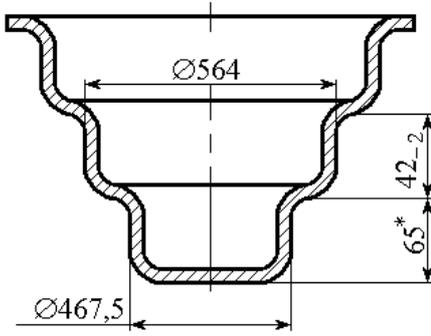
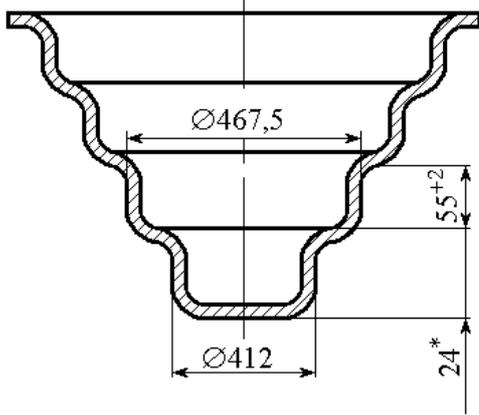
Разработанные рекомендации по проектированию технологических процессов многооперационной ступенчатой вытяжки без утонения стенки использованы при создании нового технологического процесса изготовления заготовок детали «диафрагма» под калибровку и последующую ротационную вытяжку из алюминиевого сплава А5М толщиной 3,5 мм с геометрическими соотношениями  $s/D < 0,003$  и  $H/D = 0,5$ .

Последовательность операций технологического процесса изготовления заготовок детали «диафрагма» под калибровку и последующую ротационную вытяжку приведена в табл. 4.1.

Таблица 4.1 - Технологический процесс изготовления заготовок детали «Диафрагма» под калибровку и последующую ротационную вытяжку

Перечень операций	Эскизы полуфабрикатов
1 Контроль	Лист 3,5 – А5М ГОСТ 21631-76
2 Отрезка (ножницы гильотинные)	Карты в размер 1100 <sub>-5</sub> × 1100 <sub>-5</sub>
3 Разрезка (ножницы роликовые)	Заготовка Ø 1035 <sub>-2</sub>
4 Вытяжка первая (пресс гидравлический силой 10 МН)	
5 Термообработка (отжиг)	

Перечень операций	Эскизы полуфабрикатов
6 Вытяжка вторая (пресс гидравлический силой 10 МН)	
7 Термообработка (отжиг)	
8 Вытяжка третья (пресс гидравлический силой 10 МН)	
9 Вытяжка четвертая (пресс гидравлический силой 10 МН)	 <p data-bbox="1018 1821 1385 1865">* Размеры для справок</p>
10 Термообработка (отжиг)	

Перечень операций	Эскизы полуфабрикатов
11. Вытяжка пятая (пресс гидравлический силой 10 МН)	 <p data-bbox="1013 750 1380 795">* Размеры для справок</p>
12. Вытяжка шестая (пресс гидравлический силой 10 МН)	
13. Термообработка (отжиг)	

На рисунке 4.1 приведена деталь «диафрагма» из алюминиевого сплава А5М, изготовленная методом ступенчатого набора в УСПШ с последующей калибровкой, химическим фрезерованием и ротационной вытяжкой.

Предложенные технологические процессы ступенчатой вытяжки принят к внедрению в производство на закрытом акционерном обществе «Завод экспериментального машиностроения ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королева» со значительным экономическим эффектом, полученным путем снижения трудоемкости изготовления и обеспечения качества полусферических деталей.



Рисунок 4.1 – Вид детали «диафрагма» из алюминиевого сплава А5М

Новые технологические процессы обеспечивают: увеличение удельной прочности в 1,5...1,7 раз; уменьшение массы в 1,5 раз; снижение трудоемкости в 2...3 раз; увеличение коэффициента использования материала с 0,3 до 0,9; сокращение сроков подготовки производства новых изделий в 2 раза.

## **5. Научно обоснованные технологические решения изготовления крупногабаритных полуторовых днищ реверсивной вытяжкой применительно к изготовлению деталей и узлов ракетно-космической техники**

Качественная штамповка тонкостенных полусферических и полуторовых днищ с минимальным утонением и отсутствием гофр представляет весьма сложную технологическую задачу. Для изготовления тонкостенных торовых днищ, как правило, применяют реверсивный метод штамповки [20, 23, 28, 32, 35, 36, 37, 38, 60, 61, 62].

Высокие требования надежности при низкой массе конструкций обусловили необходимость поиска и разработки новых методов штамповки торовых днищ.

Внедрен и апробирован в производстве метод штамповки тонкостенных (1...4 мм) полуторовых и полусферических днищ с применением ступенчатого набора металла, осуществляемый на универсальных гидравлических прессах [20, 23, 28, 32, 35, 36, 37, 38, 60, 61, 62].

Сущность метода ступенчатого набора изложена в разд. 1.

Разработка технологических процессов и параметров инструмента для изготовления полуторовых днищ методами вытяжки и реверсивной вытяжки включает в себя ряд основных элементов.

Приведем последовательность расчетов технологического процесса изготовления полуторовых днищ.

1 Расчет диаметра исходной заготовки по известным формулам [2, 14, 15, 35, 36, 38, 41, 42, 44].

2 Построение переходов ступенчатого набора для торовых днищ графоаналитическим способом.

Для этой цели в масштабе наносится сетка универсальных вытяжных штампов, и на этой сетке в том же масштабе вычерчивается контур торового днища.

Количество переходов (ступеней) будет зависеть от:

- а) степени вытяжки, принятой для универсальных штампов;
- б) размеров полуторовых днищ.

Как было выше сказано, площадь набора металла должна быть несколько меньше расчетной площади для образования днища, а именно:  $F_1 = 0,95F$  - для сферического днища;  $F_1 = 0,90F$  - для торового днища, где  $F$  - расчетная площадь днища с фланцем, ограниченная диаметром  $A$ .

На рисунке 5.1 изображены сечение контура матрицы окончательного штампа и контур ступенчатого набора для крупногабаритного торового днища. Однако полностью выгладить кольцевые гофры (следы ступенчатого набора металла) обтяжкой по пуансону в средней части тора не представляется возможным. Поэтому конструктивно матрицу членят на две части: наружное торовое кольцо и внутренний торовый вкладыш с разъемом по среднему диаметру  $A$ .

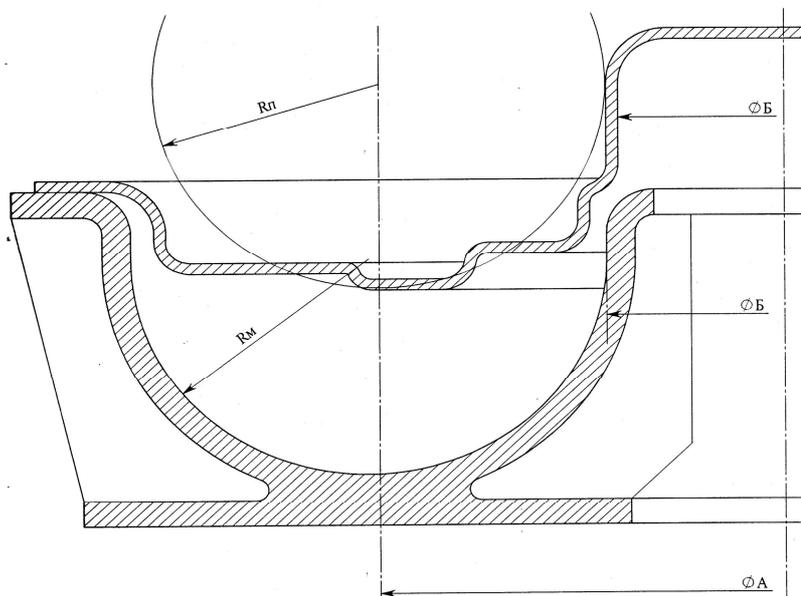


Рисунок 5.1 - Сечение контура матрицы окончательного штампа и контур ступенчатого набора для крупногабаритного торового днища

Такая конструкция матрицы позволяет вначале оформить внутреннюю часть торового днища, для чего под вкладыш накладываются мерные бруски высотой 100...120 мм и, давая нормальное давление на фланец, обжимают среднюю часть тора, затем бруски удаляют и формируют наружную часть тора с подтяжкой с фланца.

Кроме того, конструкция разъемной матрицы облегчает решение вопроса выталкивания днища из матрицы.

3 При построении ступенчатого набора для торового днища с примененном

УСПШ следует иметь в виду последнюю ступень внутренней части выполнять диаметром, равным внутреннему диаметру тора  $B$ , а набор металла для внутренней части должен быть равен площади внутренней части торового днища, ограниченной диаметром  $A$  (рисунок 5.1).

Для повышения точности обводов торового днища применяют калибровку взрывом в специальном штампе или прессовую калибровку в специальной оправе в нагретом состоянии, совмещенным с операцией отжига.

Прессовая калибровка с обтяжкой по оправке предпочтительней. Заслуживает внимания также метод ступенчатого набора с использованием конструкции штамповой оснастки дополненной электрообогревом путем монтажа ТЭНов в прижимах и кольцах матриц. Нагрев заготовки осуществляется теплом рабочих элементов штампов (с регламентированной выдержкой) контактным способом.

4 Силовые режимы и предельные возможности формоизменения первой операции вытяжки без утонения стенки осесимметричных деталей из анизотропных материалов определяются по рекомендациям, приведенным в разделе 3.

Замечание: при назначении величины коэффициентов вытяжки необходимо учитывать рекомендации по степени использования запаса пластичности В.Л. Колмогорова и А.А. Богатова [6, 7, 12, 17, 18, 40, 26].

5 Силовые режимы и предельные возможности формоизменения процесса реверсивной вытяжки осесимметричных деталей из анизотропных материалов определяются по разработанному пакету прикладных программ на ЭВМ [27, 28, 55, 59-62].

6 Определение величины разнотолщинности осесимметричных полуфабрикатов производится по рекомендациям, приведенным в работах [20, 23, 69].

7 Корректировка пооперационных коэффициентов вытяжки и силы прижима осуществляется для обеспечения минимальной величины разностенности изготавливаемых осесимметричных полуфабрикатов.

Изложенный метод штамповки полуторовых днищ с применением универсальных переналаживаемых штампов в значительной мере отвечает возросшим требованиям надежности конструкции при малой массе, а также снижению трудозатрат на изготовление командных узлов изделий.

## 6. Технологический процесс штамповки полуторовых днищ различных типоразмеров из тонколистового алюминиевого сплава АМг6

В космической технике широко используются торовые днища, изготавливаемые из двух отштампованных полуторов. Основными критериями при выборе материала для бака являются запас прочности, долговечность и малая масса.

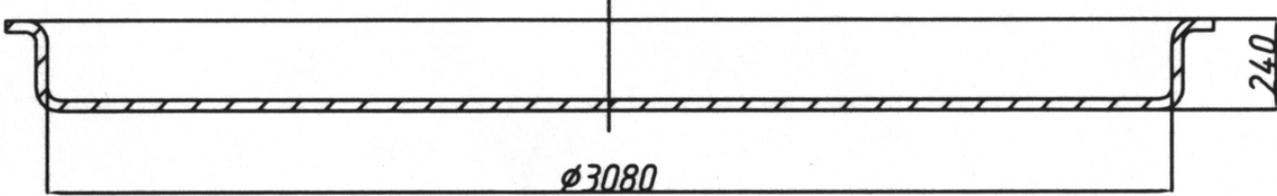
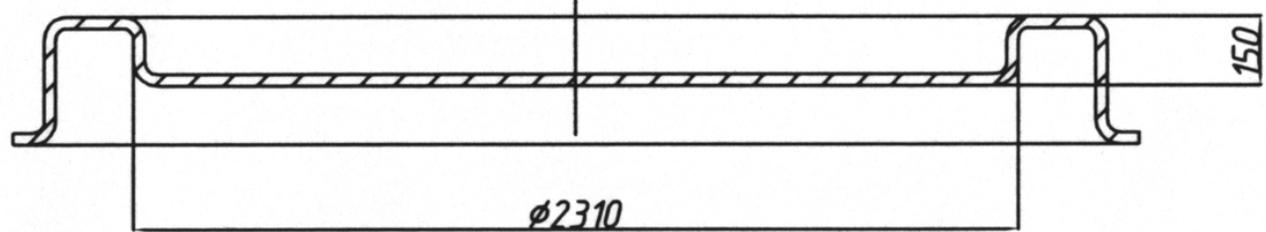
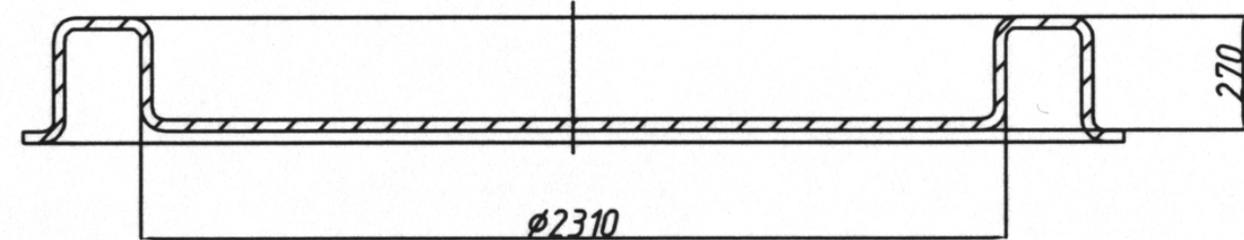
Разработанные рекомендации по проектированию технологических процессов изготовления полуторовых днищ использованы при усовершенствовании технологического процесса изготовления заготовок детали «полупотор» из алюминиевого сплава АМг6 толщиной 3,5 мм. Анизотропия механических свойств и параметры кривых упрочнения и разрушения приведены в работах [47, 49, 31, 69].

Последовательность формообразующих операций технологического процесса изготовления заготовок детали «полупотор» и расчетные  $\bar{P}_{расч} = P_{расч} / (2\pi r_n s_0 \sigma_{0,2})$ , и экспериментальные  $\bar{P}_{эксп} = P_{эксп} / (2\pi r_n s_0 \sigma_{0,2})$  величины силы на операциях вытяжки и реверсивной вытяжки полуторовых днищ из алюминиевого сплава АМг6 приведены в таблице 6.1. Расчеты выполнены при  $\mu_M = 0,05$ . С целью оценки работоспособности разработанных математических моделей деформирования выполнены экспериментальные исследования силовых режимов первой и последующих операций вытяжки осесимметричных деталей в производственных условиях. Регистрация силовых режимов производилась по манометру на каждой операции технологических процессов вытяжки полуторовых тонкостенных деталей.

Сравнение результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных по силовым режимам операций вытяжки (таблице 6.1) указывает на их удовлетворительное согласование (до 15 %).

В таблице 6.2 приведен новый технологический процесс изготовления заготовок детали «полупотор» из алюминиевого сплава АМг6 толщиной 3,5 мм.

Таблица 6.1 - Технологический процесс изготовления заготовок детали «Полутор» из алюминиевого сплава АМгб

Перечень операций	Эскизы полуфабрикатов	$\bar{P}_{расч} / \bar{P}_{эксн}$
1 Термообработка (отжиг) 2 Вытяжка первая (пресс гидравлический силой 10 МН)		0,963/ 1,107
3 Термообработка (отжиг) 4 Вытяжка реверсивная (пресс гидравлический силой 10 МН)		1,19/ 1,368
5 Термообработка (отжиг) 6 Вытяжка реверсивная. (пресс гидравлический силой 10 МН)		1,09/ 1,253

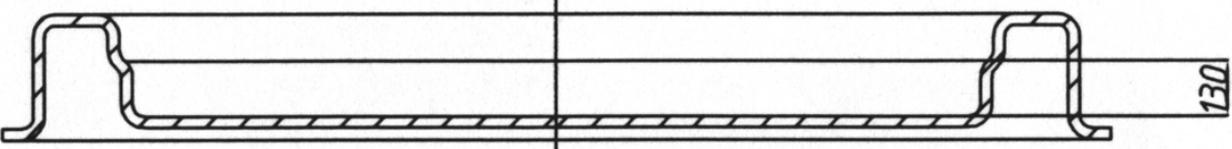
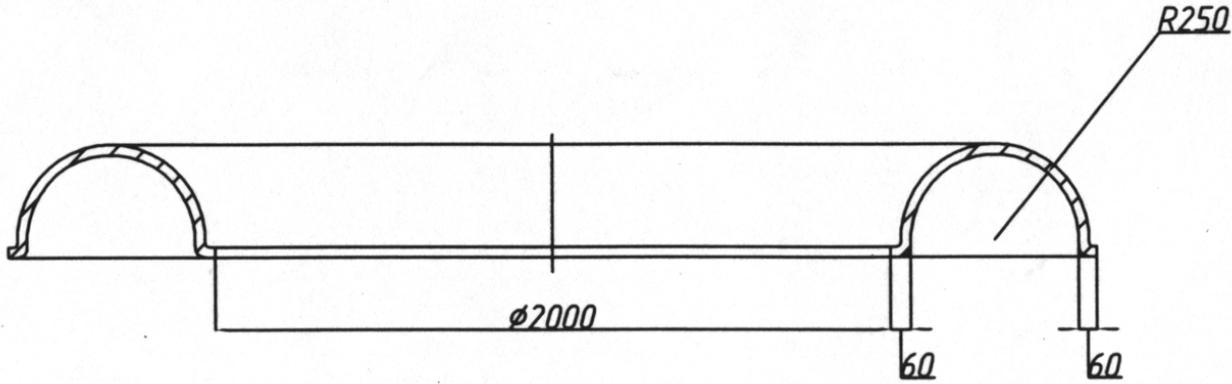
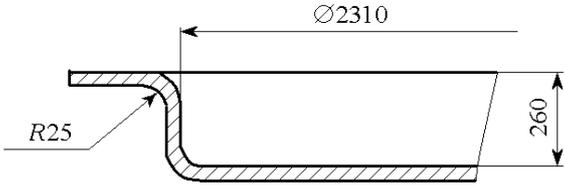
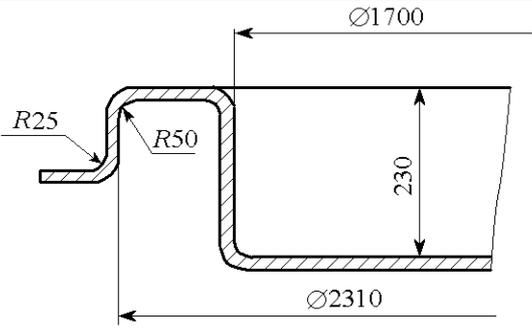
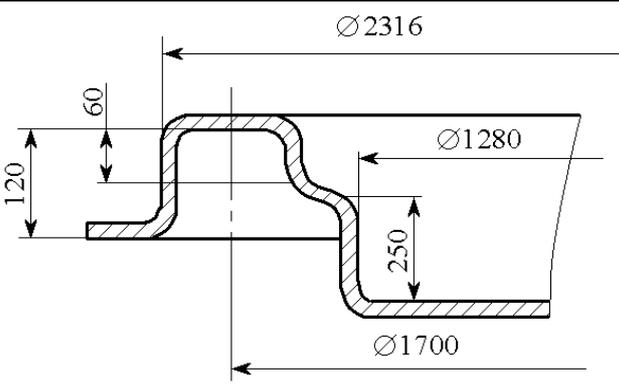
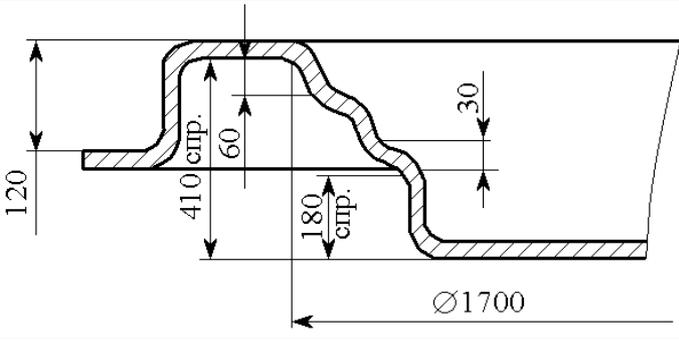
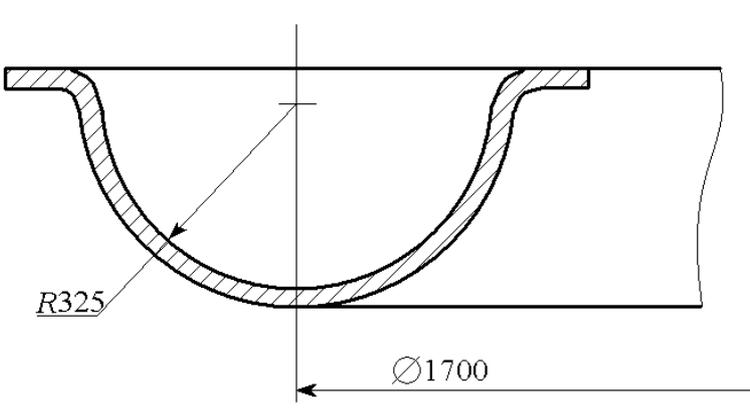
Перечень операций	Эскизы полуфабрикатов	$\bar{P}_{расч} / \bar{P}_{эсп}$
7 Термообработка (отжиг) 8 Вытяжка реверсивная (пресс гидравлический силой 10 МН)		
9 Термообработка (отжиг) 10 Калибровка (пресс гидравлический силой 10 МН)		

Таблица 6.2 - Технологический процесс изготовления заготовок детали «полупотор» из алюминиевого сплава АМг6М

Перечень операций	Эскизы полуфабрикатов
1 Термообработка (отжиг) 2 Вытяжка первая. (пресс гидравлический силой 10 МН)	
3 Термообработка (отжиг) 4 Вытяжка реверсивная (пресс гидравлический силой 10 МН)	
5 Термообработка (отжиг) 6 Вытяжка (пресс гидравлический силой 10 МН).	
7 Термообработка (отжиг) 8 Вытяжка реверсивная (пресс гидравлический силой 10 МН)	
9 Термообработка (отжиг) 10 Обтяжка внутренней горловины полупотора (пресс гидравлический силой 10 МН)	

На закрытом акционерном обществе «Завод экспериментального машиностроения ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королева» использованы разработанные рекомендации для усовершенствования технологического процесса изготовления полуфабрикатов полуторовых деталей из тонколистового алюминиевого сплава АМг6, который принят к внедрению в производство. Изготовленное полуторовое днище из алюминиевого сплава АМг6 приведено на рисунке 6.1.

Технологический процесс обеспечивает изготовление крупногабаритных тонкостенных заготовок полуторовых деталей с минимальной величиной разностенности (до 8 %), заданную величину степени использования ресурса пластичности, эксплуатационные требования и снижение трудоемкости их изготовления, сокращение сроков подготовки производства. При холодной штамповке в универсальных штампах (матричных кольцах) нет необходимости в дорогостоящих штампах с обогревом.



Рисунок 6.1 - Полуторовое днище из алюминиевого сплава АМг6

## 7. Технико-экономическая оценка полученных результатов

1 На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны научно обоснованные методики расчета технологических параметров многооперационной ступенчатой вытяжки без утонения стенки. Разработан новый наукоемкий технологический процесс холодной штамповки заготовок для изготовления полусферических днищ из высокопрочного титанового сплава ПТ-3Вкт толщиной 3,5 мм с геометрическими соотношениями  $s/D < 0,003$  и  $H/D = 0,5$ , основанный на методе ступенчатого набора в универсальных сборных переналаживаемых штампах с последующей калибровкой и химическим фрезерованием. При холодной штамповке листового материала в универсальных штампах (матричных кольцах) нет необходимости в дорогостоящих штампах с обогревом, значительно повышается культура производства, снижается травматизм. Холодная штамповка более экономична с точки зрения энергозатрат. По сравнению с вариантом получения титановых полусферических днищ механической обработкой заготовок, полученных методом горячей объемной штамповки, способ позволяет снизить трудоемкость механической обработки с 20 смен до 2 часов.

2 Создан новый технологический процесс изготовления заготовок детали «диафрагма» под калибровку и последующую ротационную вытяжку из алюминиевого сплава А5М толщиной 3,5 мм с геометрическими соотношениями  $s/D < 0,003$  и  $H/D = 0,5$  методом ступенчатого набора. Новые технологические процессы ступенчатой вытяжки принят к внедрению в производство на закрытом акционерном обществе «Завод экспериментального машиностроения ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королева». Новые технологические процессы обеспечивают: увеличение удельной прочности в 1,5...1,7 раз; уменьшение массы в 1,5 раз; снижение трудоемкости в 2...3 раз; увеличение коэффициента использования материала с 0,3 до 0,9; сокращение сроков подготовки производства новых изделий в 2 раза.

3 На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований

разработаны рекомендации по расчету технологических параметров процесса реверсивной вытяжки полуторовых днищ. Результаты этих работ использованы при проведении научно-исследовательских и технологических работ по совершенствованию технологического процесса изготовления полуфабрикатов полуторовых деталей из тонколистового алюминиевого сплава АМг6. Технологический процесс обеспечивает изготовление полуторовых днищ с минимальной величиной разностенности (до 8 %), заданную величину степени использования ресурса пластичности, эксплуатационные требования и снижение трудоемкости их изготовления, сокращение сроков подготовки производства. При штамповке в холодную в универсальных штампах (матричных кольцах) нет необходимости в дорогостоящих штампах с обогревом, значительно повышается культура производства, снижается травматизм. Холодная штамповка более экономична с точки зрения энергозатрат.

## **8. Использование результатов научно-исследовательской работы в учебном процессе**

Результаты научно-исследовательской работы будут использованы при модернизации учебных планов подготовки бакалавров техники и технологии направления 150700 «Машиностроение» профиль «Машины и технология обработки металлов давлением» и студентов, обучающихся по направлению 150200 «Машиностроительные технологии и оборудование» специальности 150201 «Машины и технология обработки металлов давлением», при выполнении курсовых работ и дипломных проектов, а также учебных планов подготовки магистров по направлениям подготовки 150400 «Технологические машины и оборудование» программ подготовки: 15040039 "Теория и технология штамповки анизотропных материалов", 15040041 «Высокоэффективные технологические процессы листовой и объемной штамповки», 15040040 «Высокоскоростные методы обработки металлов давлением».

Отдельные результаты исследований использованы в учебном процессе в курсах «Новые технологические процессы и оборудование» и «Механика процессов пластического формоизменения», «Теория обработки металлов давлением», «Теория пластичности и ползучести», «Штамповка анизотропных заготовок», «Производство технологического оборудования», «Горячая штамповка», «Новые виды горячей и холодной объемной штамповки», «Нагрев и нагревательные устройства» для бакалавров техники и технологии направления 150700 «Машиностроение» профиль «Машины и технология обработки металлов давлением» и студентов, обучающихся по направлению 150200 «Машиностроительные технологии и оборудование» специальности 150201 «Машины и технология обработки металлов давлением», при выполнении курсовых работ и дипломных проектов.

Разработаны новые методические указания по проведению лабораторных работ по курсу «Теория обработки металлов давлением» (приложение 2), а также новый конспект лекций по курсу «Физические основы пластической деформации»

(приложение 1).

По результатам научных исследований подготовлены к опубликованию два учебных пособия:

1. Иванова Э.А., Трегубов В.И., Платонов В.И., Пасынков А.А. Специальные технологические процессы горячей обработки металлов давлением / под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. 160 с.

2. Соколов Э.М., Ларина М.В., Трегубов В.И., Ларин С.Н. Часть 6. Охрана труда и окружающей среды. Руководство по дипломному проектированию / под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. 125с.

При выполнении научно-исследовательской работы привлекались студенты в качестве непосредственных исполнителей НИР. Студентами, привлекаемыми к выполнению НИР, получено 5 Диплом лауреатов Всероссийских научно-технических конференций.

## 9. Программа внедрения результатов НИР в образовательный процесс

	Форма внедрения	Тип внедрения	Место внедрения
	1	2	3
1.	Дисциплина «Штамповка анизотропных материалов»	<p>Дополнение/изменение в уже существующий курс в виде новых лекций.</p> <p>Лекция № 1. Основные уравнения и соотношения для анализа операций пластического деформирования кристаллических анизотропных листовых заготовок.</p> <p>1.1. Условие текучести и ассоциированный закон пластического течения ортотропного материала.</p> <p>1.2. Плоское напряженное состояние анизотропного материала.</p> <p>1.3. Плоское деформированное состояние анизотропного тела.</p> <p>Лекция № 2. Математические модели упрочнения кристаллического анизотропного материала.</p> <p>2.1. Математическая модель изотропного упрочнения материала.</p> <p>2.2. Математическая модель анизотропного упрочнения ортотропного материала.</p> <p>Лекция № 3. Феноменологические модели разрушения кристаллических анизотропных материалов по накоплению повреждаемости материала.</p> <p>3.1. Основные предположения и формулировка критериев разрушения.</p> <p>3.2. Учет повреждаемости при исследовании пластиче-</p>	<p>ГОУ ВПО «Тульский государственный университет», Политехнический институт, Механико-технологический факультет, кафедра «Механика пластического формоизменения»</p>

	<p>ского формоизменения.</p> <p>Лекция № 4. Критерии локальной потери устойчивости кристаллических ортотропных анизотропно упрочняющихся материалов.</p> <p>4.1. Критерий локальной потери устойчивости кристаллических ортотропных анизотропно упрочняющихся материалов для плоского напряженного состояния заготовки.</p> <p>4.2. Критерий локальной потери устойчивости кристаллических ортотропных анизотропно упрочняющихся материалов для плоского напряженного и плоского деформированного состояний заготовки.</p> <p>Лекция № 5. Устойчивость трубной заготовки из кристаллического анизотропного материала в пластической области в виде образования складок.</p> <p>5.1. Основные соотношения и предположения.</p> <p>5.2. Условие устойчивости цилиндрической заготовки.</p> <p>5.3. Обсуждение результатов расчетов.</p> <p>Лекция № 6. Условие пластической потери устойчивости в виде горообразования (волнистости) прямоугольной пластины из кристаллического анизотропного материала.</p> <p>6.1. Условие пластичности кристаллического анизотропного материала.</p> <p>6.2. Схема выпучивания элемента листа.</p>	
--	---	--

		<p>6.3. Работа внутренних сил при выпучивании анизотропной пластины (потенциальная энергия деформации изгиба и кручения).</p> <p>6.4. Работа внешних сил на контуре элемента пластинки (изменение потенциальной энергии деформации срединной плоскости пластины при выпучивании).</p> <p>Лекция № 7. Методика экспериментального определения характеристик анизотропии механических свойств листового материала.</p> <p>7.1. Методика экспериментального определения параметров кривых упрочнения.</p> <p>7.2. Методика экспериментального определения констант критериев разрушения.</p> <p><i>Количество академических часов -17 час.</i></p>	
2.	Методические указания по выполнению курсовой работы по дисциплине «Штамповка анизотропных материалов»	<p>Дополнение/изменение в уже существующий курс в виде новых методических указаний по выполнению курсовой работы.</p> <p>Введение.</p> <p>1. Основные уравнения анизотропного тела.</p> <p>1.1. Условие текучести и ассоциированный закон пластического течения ортоотропного материала.</p> <p>1.2. Плоское напряженное состояние анизотропного материала.</p> <p>1.3. Плоское деформированное состояние анизотропного тела.</p> <p>1.4. Математические модели упрочнения анизотропного материала.</p>	ГОУ ВПО «Тульский государственный университет», Политехнический институт, Механико-технологический факультет, кафедра «Механика пластического формоизменения»

		<p>1.5. Феноменологические модели разрушения анизотропного материала.</p> <p>1.6. Основные предположения и формулировка критериев разрушения.</p> <p>1.7. Учет повреждаемости при исследовании пластического формоизменения.</p> <p>2. Рекомендации по проектированию технологических процессов.</p> <p>2.1 Расчет параметров технологического процесса.</p> <p>2.2. Расчет параметров инструмента.</p> <p>2.3. Расчет технологических усилий и работы деформации.</p> <p>2.4. Оценка ожидаемых механических свойств получаемого изделия.</p> <p>2.5. Задание.</p> <p>Библиографический список</p>	
3.	<p>Методические указания по выполнению лабораторных работ по курсу «Штамповка анизотропных материалов».</p>	<p>Дополнение/изменение в уже существующий курс в виде новых лабораторных работ.</p> <p>Общие требования и методические указания по подготовке, выполнению, оформлению и сдаче лабораторных работ.</p> <p>1. Общие требования и методические указания по подготовке и выполнению лабораторных работ.</p> <p>2. Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ.</p> <p>3. Методика обработки результатов измерений и наблюдений. Правила оформления и сдачи отчетов по лабораторным работам.</p> <p>Лабораторная работа № 1.</p>	<p>ГОУ ВПО «Тульский государственный университет», Политехнический институт, Механико-технологический факультет, кафедра «Механика пластического формоизменения»</p>

		<p>Определение характеристик анизотропии механических свойств при плоском напряжённом состоянии.</p> <p>Лабораторная работа № 2. Определение характеристик анизотропии механических свойств при плоском деформированном состоянии.</p> <p>Лабораторная работа № 3. Влияние анизотропии механических свойств на фестонообразование при вытяжке.</p> <p>Лабораторная работа № 4. Влияние анизотропии механических свойств на толщину стенки стакана при вытяжке.</p> <p>Лабораторная работа № 5. Исследование процесса вытяжки с утонением стенки ортотропного анизотропно-упрочняющегося материала.</p> <p>Лабораторная работа № 6. Исследование фестонообразования при комбинированной вытяжке.</p> <p>Лабораторная работа № 7. Устранение фестонов при вытяжке и комбинированной вытяжке анизотропного материала.</p> <p>Лабораторная работа № 8. Исследование процесса обратного выдавливания трубной заготовки из ортотропного анизотропно-упрочняющегося материала.</p> <p><i>Количество академических часов -17 час.</i></p>	
4.	Курс «Специальные технологические процессы холодной обработки металлов давлением»	<p>Дополнение/изменение в уже существующий курс в виде новых лекций.</p> <p>Лекция № 1. Математическая модель первой операции вы-</p>	ГОУ ВПО «Тульский государственный университет», Политехнический институт, Механи-

	<p>тяжки в радиальной матрице осесимметричных деталей.</p> <p>1.1. Геометрическая модель.</p> <p>1.2. Напряженное состояние.</p> <p>1.3. Деформированное состояние.</p> <p>1.4. Сила операции.</p> <p>Лекция № 2. Влияние технологических параметров на силовые режимы, предельные возможности формоизменения и формирование показателей качества изготавливаемых осесимметричных деталей.</p> <p>2.1. Силовые режимы первой операции вытяжки.</p> <p>2.2. Предельные возможности формоизменения.</p> <p>Лекция № 3. Влияние анизотропии механических свойств исходных материалов на силовые режимы, предельные возможности формоизменения и формирование показателей качества изготавливаемых осесимметричных деталей.</p> <p>3.1. Влияние анизотропии механических свойств на силовые режимы.</p> <p>3.2. Влияние анизотропии механических свойств на предельные возможности формоизменения.</p> <p>Лекция № 4. Математическая модель многооперационной вытяжки ступенчатых осесимметричных деталей из кристаллических анизотропных материалов.</p> <p>4.1. Геометрическая модель.</p> <p>4.2. Напряженное состояние.</p> <p>4.3. Деформированное состояние.</p>	<p>ко-технологический факультет, кафедра «Механика пластического формоизменения»</p>
--	--	--

	<p>4.4. Сила операции. Лекция № 5. Установление влияния анизотропии механических свойств исходных материалов, технологических параметров на силовые режимы, предельные возможности формоизменения и формирование показателей качества изготавливаемых осесимметричных деталей.</p> <p>5.1. Напряжения и сила. 5.2. Предельные возможности формоизменения. 5.3. Влияние анизотропии механических свойств на предельные возможности формоизменения.</p> <p>Лекция № 6. Математическая модель реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из кристаллических анизотропных материалов.</p> <p>6.1. Геометрическая модель. 6.2. Напряженное состояние. 6.3. Деформированное состояние. 6.4. Сила операции.</p> <p>Лекция № 7. Установление влияния анизотропии механических свойств исходных материалов, технологических параметров на силовые режимы, предельные возможности формоизменения и формирование показателей качества изготавливаемых осесимметричных деталей.</p> <p>7.1. Напряженное состояние. Силовые режимы. 7.2. Оценка повреждаемости материала осесимметричных деталей при реверсивной вытяжке. 7.3. Предельные возможно-</p>	
--	---	--

	<p>сти формоизменения.</p> <p>7.4. Относительная величина разностенности изготавливаемых деталей.</p> <p>Лекция № 8. Влияние анизотропии механических свойств исходных материалов на силовые режимы, предельные возможности формоизменения и формирование показателей качества изготавливаемых осесимметричных деталей.</p> <p>8.1. Влияние анизотропии механических свойств заготовки на силовые режимы.</p> <p>8.2. Влияние анизотропии механических свойств заготовки на предельные возможности формообразования.</p> <p>8.3. Влияние анизотропии механических свойств на относительную величину разностенности изготавливаемых деталей.</p> <p>Лекция № 9. Экспериментальные исследования.</p> <p>9.1. Экспериментальные исследования силовых режимов вытяжки ступенчатых осесимметричных деталей из кристаллических анизотропных материалов.</p> <p>9.2. Экспериментальные исследования силовых режимов операции реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем.</p> <p><i>Количество академических часов -17 час.</i></p>	
--	--	--

## **10. Сведения о выполнении целевых индикаторов и показателей федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы»**

### **10.1. Список монографий, опубликованных в 2010 г.**

1. Яковлев С.С., Черняев А.В., Трегубов В.И. Изотермическое деформирование осесимметричных деталей в режиме кратковременной ползучести: монография // под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. 161 с.

2. Кухарь В.Д., Селедкин Е.М., Киреева А.Е. Математическое моделирование процессов магнитно-импульсной обработки металлов: монография в 2-х частях. Часть 1. Механико-пластическое формоизменение процессов магнитно-импульсной обработки / Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. 160 с. (опубликована 2010 г.).

3. Кухарь В.Д., Селедкин Е.М., Селедкин С.Е. Формовка листовых заготовок в состоянии сверхпластичности / Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. 168 с. (опубликована 2010 г.).

### **10.2. Список учебных пособий с грифом УМО, опубликованных в 2010 г.**

1. Гусев И.А., Маленичев Е.С., Трегубов В.И., Чачина Е.Б., Васин Л.А., Курский В.А. Руководство по дипломному проектированию. В 5-и частях. Часть 4. Организационно-экономическая часть дипломных проектов кузнечно- и листоштамповочных цехов: учеб. пособие под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. 215 с.

2. Герасимова О.М., Трегубов В.И., Яковлев С.С., Кухарь В.Д. Руководство по дипломному и курсовому проектированию. В 5 частях. Часть 2. Листовая штамповка. Технологические расчеты. Расчет и проектирование штампов: учеб. пособие // под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. 258 с.

### **10.3. Список научно-методических статей, опубликованных в 2010 г.**

1. Панфилов Г.В., Яковлев С.С., Ларин С.Н. НИРС в семестре – школа мастерства // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2010. С. 16-19.
2. Ларин С.Н., Яковлев С.С. Подготовка и защита выпускной квалификационной работы инженера по специальности «Машины и технология обработки металлов давлением» // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2010. С. 26-29.
3. Кухарь В.Д., Нечаев Л.М., Киреева А.Е. Пути повышения качества подготовки студентов по учебному курсу «Теоретическая механика» // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 53-55.
4. Киреева А.Е., Клейменова Э.А., Сазонов Д.Ю. Объем и роль самостоятельной работы студентов при изучении курса теоретической механики // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 218-226.

### **10.4. Список статей, опубликованных в ведущих научных журналах в 2010 г.**

1. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Яковлев С.П. Ротационная вытяжка трубных заготовок из анизотропного материала // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. Москва. Научный совет РАН. 2010. № 1. С.89-97.
2. Трегубов В.И., Яковлев С.С. Геометрические показатели качества осесимметричных деталей, изготовленных методом ротационной вытяжки // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. Москва. Научный совет РАН. 2010. № 1. С.97-102.
3. Кухарь В.Д., Киреева А.Е. Обоснование применения индуктора-концентратора для повышения эффективности сборочных операций импульсным магнитным полем // Кузнечно-штамповочное производство, 2010, №10, С. 29-33.

4. Яковлев С.С. // WHO IS WHO В РОССИИ. Энциклопедия личностей. Schweiz: WHO IS WHO. 4 выпуск. 2010. С. 2769-2770.
5. Черняев А.В., Полухин Д.С., Яковлев С.С. Влияние геометрических размеров трубной заготовки на силовые режимы и предельные возможности формоизменения обратного выдавливания в режиме ползучести // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 70-77.
6. Яковлев С.П., Калашников А.Е., Яковлев С.С. Складкообразование анизотропной листовой заготовки при вытяжке // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 78-88.
7. Яковлев С.П., Драбик А.Н., Яковлев С.С. Силовые режимы ротационной вытяжки конических деталей из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 37-43.
8. Панов А.А., Панфилов Г.В., Шуляков А.В. Оценка интенсивности изменения напряжений в меридианальной плоскости осесимметричных задач теории пластичности // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 2. Часть 2. С. 34-43.
9. Панфилов Р.Г., Парамонов Р.А., Хвостов Е.Ю. Условие полной пластичности в осесимметричных задачах теории пластичности // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 2. Часть 2. С. 119-128.
10. Яковлев С.П., Чудин В.Н., Черняев А.В. Осесимметричное выдавливание фланцевых заготовок при вязко-пластичности // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 2. Часть 2. С. 61-69.
11. Черняев А.В., Пасынков А.А. Теоретические исследования операции прямого изотермического выдавливания элементов трубопроводов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 2. Часть 2. С. 127-135.
12. Яковлев С.С., Чудин В.Н., Перепелкин А.А., Черняев А.В. Горячее выдавливанием ребер на плитах // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 2. Часть 2. С. 79-85.
13. Яковлев С.П., Трегубов В.И., Яковлев С.С. Изменение механических свойств горячекатаных труб из стали 12ХЗГНМФА при ротационной вытяжке //

Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 2. Часть 2. С. 3-10.

14. Власов К.В. Ротационная вытяжка плоских стальных заготовок обоймой давящих элементов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 2. Часть 2. С. 75-78.

15. Черняев А.В., Перепелкин А.А., Чудин В.Н. Технологические режимы выдавливания ребер на плитах в режиме кратковременной ползучести // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. С. 74-79.

16. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Дудка Д.В. Технологии изготовления осесимметричных деталей ротационной вытяжкой // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. С. 121-126.

17. Трегубов В.И., Дудка Д.В., Яковлев С.С. Опыт изготовления кольцевых деталей с переменной толщиной стенки изделий специального назначения // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. С. 80-84.

18. Ларин С.Н. Технологические процессы формообразования однослойных оболочек газом // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. С. 134-137.

19. Платонов В.И., Поликарпов Е.Ю., Яковлев С.С. Осесимметричная вытяжка с утонением стенки толстостенных заготовок из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. С. 89-101.

20. Яковлев С.С., Платонов В.И., Поликарпов Е.Ю. Математическое моделирование осесимметричной вытяжки с утонением стенки анизотропных заготовок // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. С. 17-24.

21. Дудка Д.В., Яковлев С.С., Бессмертная Ю.В. Критерий шейкообразования кристаллического анизотропного листового материала при двухосном растяжении // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. С. 108-112.

22. Яковлев С.С., Дудка Д.В. Математические модели анизотропного упрочнения ортотропных кристаллических материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. С. 30-36.
23. Яковлев С.С., Дудка Д.В. Феноменологические модели разрушения кристаллических ортотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. Т. 3. С. 138-144.
24. Дудка Д.В., Яковлев С.С., Бессмертная Ю.В. Локализация деформации кристаллического анизотропного листового материала при пластическом двухосном растяжении // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. 3. С. 85-88.
25. Яковлев С.С., Дудка Д.В. Ротационное формоизменение конических деталей из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. С. 3-11.
26. Панфилов Г.В., Судаков П.В., Хвостов Е.Ю. Алгоритм аналитического описания участков пластической области методом линий скольжения // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. С. 127-133.
27. Пасько А.Н., Семенова Л.П. Особенности многопереходного деформирования стержневых заготовок // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. Т. 3. С. 166-172.
28. Пасько А.Н., Ткач О.А. Моделирование многопереходного процесса ротационнойковки // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. Т. 3. С. 69-73.
29. Пасько А.Н., Алексеев Д.А. Математическая модель трехмерного течения упругопластического материал // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. Т. 3. С. 177-180.
30. Алексеев Д.А., Пасько А.Н., Алексеев П.А. Моделирование контакта инструмента с заготовкой в трехмерных задачах обработки металлов давлением // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. Т. 3. С. 173-176.

31. Кухарь В.Д., Киреева А.Е. Расчет конструктивных параметров сборочного соединения с заданным усилием разъема // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. Т. 3. С. 12-16.
32. Легейда В.Ю. Математическое моделирование процессов раздачи цилиндрической тонкостенной заготовки под действием равномерно распределенного давления // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. Т. 3. С. 145-149.
33. Легейда В.Ю. Газостатическая формовка трубчатой заготовки в матрицу с заданным рельефом // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. Т. 3. С. 150-154.
34. Пасько А.Н., Ткач О.А. Влияние технологических параметров на толщину стенки заготовки при ротационной ковке // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 2. Часть 2. С. 70-74.
35. Семенова Л.П. Силовые режимы формообразования утолщений на стенках трубчатых заготовок // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 2. Часть 2. С. 103-109.
36. Кухарь В.Д., Семёнова Л.П., Семенов А.А. Холодная объемная штамповка оживальных головных частей на изделиях // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. №10. (принята в печать).
37. Кухарь В.Д., Ткач О.А. Осадка кольца в матрицу различной геометрии // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. №10. 10-14.
38. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Хвостов Е.Ю. Совершенствование технологии многооперационной холодной штамповки остrokонечных цилиндрических деталей из малопластичных сталей // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. №11. 14-19.

## 10.5. Список статей, опубликованных в межвузовских сборниках научных трудов в 2010 г.

1. Калашников А.Е. Подход к анализу складкообразования анизотропного листа при вытяжке // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2010. С. 128-130.
2. Полухин Д.С. Неоднородность эквивалентной деформации и эквивалентного напряжения по толщине цилиндрической детали при обратном выдавливании // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2010. С. 214-216.
3. Перепелкин А.А. Изотермическое выдавливание оребрений в режиме кратковременной ползучести // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2010. С. 209-211.
4. Драбик А.Н. Технологические параметры ротационной вытяжки конических деталей из анизотропных материалов // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2010. С. 99-101.
5. Кухарь В.Д., Грязев М.В., Киреева А.Е. Разработка технологического процесса сборки изделия «Баллон» методом магнитно-импульсной штамповки // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 44-46.
6. Грязев М.В., Кухарь В.Д., Киреева А.Е. Системная модель магнитно-импульсной обработки металлов давлением // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 46-49.
7. Кухарь В.Д., Макарова Л.Л. Соотношение между компонентами девиатора микронапряжений и тензора пластических деформаций // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 49-53.
8. Маркелов С.С., Пасько А.Н. Исследование неизотермического движения вязкой жидкости в пределах гидродинамического пограничного слоя // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 69-72.

9. Митяев А.Г., Ткач О.А. Поперечные колебания сосредоточенных масс на упругой нити // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 72-76.
10. Семенова Л.П., Пасько А.Н. Влияние схемы деформирования на процесс формирования утолщений на стенках трубчатых заготовок // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 106-111.
11. Ткач О.А., Митяев А.Г. Технологические параметры осадки кольца в ступенчатую матрицу // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 123-127.
12. Кухарь В.Д., Легейда В.Ю., Киреева А.Е. Исследование процесса многопереходной вытяжки шарообразной головки // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 178-184.
13. Кухарь В.Д., Грязев М.В., Киреева А.Е. Магнитно-импульсная сборка фланца с корпусом // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 206-211.
14. Пасько А.Н., Алексеев Д.А. Конечнэлементная математическая модель трансляционного упрочнения упруго-пластического материала // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 231-235.
15. Алексеев Д.А., Пасько А.Н. Моделирование процесса свободной гидроформовки купола // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 235-237.
16. Чудин В.Н., Черняев А.В., Пасынков А.А. Подход к анализу операции обжима и выдавливания элементов осесимметричной оболочки при кратковременной ползучести // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 142-147.
17. Бессмертная Ю.В. К вопросу деформирования анизотропных упрочняющихся материалов // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 184-186.

18. Перепелкин А.А. Теоретические исследования операции горячего выдавливания ребер на плитах // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 194-197.
19. Полухин Д.С. Силовые и деформационные параметры обратного выдавливания трубных заготовок в режиме ползучести // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 1. С. 197-199.
20. Ларин С.Н. Экспериментальные исследования процесса пневмоформовки куполообразных деталей // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения. Тула; ТулГУ, 2010. С. 46-49.
21. Дудка Д.В., Яковлев С.С. Пластическое формообразование ортотропных кристаллических анизотропных материалов // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения. Тула; ТулГУ, 2010. С. 25-30.
22. Черняев А.А., Пасынков А.А., Перепелкин А.А. Экспериментальные исследования операций выдавливания заготовок и их элементов // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения. Тула; ТулГУ, 2010. С. 36-41.
23. Пасынков А.А. Горячая раздача и высадка законцовок трубопроводов // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения. Тула; ТулГУ, 2010. С. 14-18.

#### **10.6. Список тезисов докладов, опубликованных в 2010 г.**

1. Бессмертная Ю.В. Теория деформирования анизотропных упрочняющихся материалов // XXXVI Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2010. Том 1. С. 253-254.
2. Бессмертная Ю.В., Дериева А.Н. Оценка предельных возможностей формообразования анизотропного листового материала // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации». Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. С. 4-5.

3. Пасынков А.А. Изотермическая раздача и высадка законцовок трубопроводов // XXXVI Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2010. Том 1. С. 295-297.
4. Перепелкин А.А. Горячее выдавливание ребер на плитах // XXXVI Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2010. Том 1. С. 298-299.
5. Полухин Д.С. Технологические параметры обратного выдавливания трубных заготовок в режиме ползучести // XXXVI Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2010. Том 1. С. 300-302.
6. Дериева А.Н. Математическая модель операции вытяжки с утонением стенки толстостенной цилиндрической заготовки из анизотропного материала // XXXVI Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2010. Том 1. С. 265-267.
7. Наумова И.А. Разрушения анизотропного материала в режиме кратковременной ползучести // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации». Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. С. 36-37.
8. Дериева А.Н. Вытяжка с утонением стенки толстостенных заготовок из анизотропных материалов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации». Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. С. 15-16.
9. Перепелкин А.А. Изготовление оребренных конструкций панелей и корпусов днищ // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации». Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. С. 40-42.
10. Дериева А.Н. Математическое моделирование вытяжки с утонением стенки толстостенных цилиндрических заготовок из анизотропного материала // Современные проблемы математики и механики глазами студентов: тезисы и доклады

студентов на международной конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Вып. 5. С. 102-105.

11. Дериева А.Н. Технология изготовления толстостенных осесимметричных деталей // Современные проблемы математики и механики глазами студентов: тезисы и доклады студентов на международной конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Вып. 5. С. 105-108.

#### **10.7. Список, поданных заявок на изобретение в 2010 г.**

1. Заявка на изобретение № 2009128344 от 21.07.2009. Многослойная ячеистая конструкция и способ ее изготовления. Авторы: Коротков В.А., Яковлев С.С., Чудин В.Н., Яковлев С.П., Ларин С.Н., Соболев Я.А.

#### **10.8. Список, полученных патентов в 2010 г.**

1. Пат. 2392079 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 21 D 22/02. Способ штамповки тонкостенных полусферических днищ и устройство для его осуществления / Дятченко В.Ю., Дериева А.Н., Коротков В.А., Поликарпов Е.Ю., Яковлев С.С.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тульский государственный университет». - № 2008140592; опубл. 20.06.2010, Бюл. № 17. – 8 с.

#### **10.9. Список защит кандидатских диссертаций в 2010 г.**

Количество защит кандидатских диссертаций – 2.

Количество защит магистерских диссертаций – 8.

1. Полухин Дмитрий Сергеевич «Изотермическое обратное выдавливание трубных заготовок из высокопрочных анизотропных материалов в режиме кратковременной ползучести» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением.

2. Драбик Андрей Николаевич «Ротационная вытяжка конических деталей из анизотропных заготовок» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением.

3. Подготовлено 8 магистров по направлению «Технологические машины и оборудование», программам подготовки «Теория и технология штамповки анизотропных заготовок», «Высокоскоростные методы обработки металлов давлением» и «Высокоэффективные технологические процессы листовой и объемной штамповки».

#### **10.10. Список защит докторских диссертаций в 2010 г.**

1. Поликарпов Евгений Юрьевич «Научное обоснование технологических решений изготовления крупногабаритных осесимметричных деталей ответственного назначения из высокопрочных анизотропных материалов» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением.

2. Черняев Алексей Владимирович «Теория и технология изотермического деформирования осесимметричных деталей в режиме кратковременной ползучести» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением (защита состоится в первом квартале 2011 г.).

#### **10.11. Признание заслуг коллектива**

1. Премия имени С.И. Мосина 2010 года в области разработок военной техники, технологии и оборудования, имеющих двойное применение (д.т.н., проф. Яковлев С.П., д.т.н., проф. Яковлев С.С., д.т.н., проф. Трегубов В.И.).

2. Почетное звание «Основатель научной школы» (сертификат, удостоверение, нагрудный знак) Российской академии естествознания (д.т.н., проф. Яковлев С.П.).

3. «The international Business Who is Who Corp» «WHO IS WHO В РОССИИ» / Сертификат выдан корпорацией (д.т.н., проф. Яковлев С.С.).

4. Диплом 2 степени лауреата Всероссийской научно-технической конферен-

ции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» Министерства образования и науки РФ (студ. Дериева А.Н.).

5. Диплом 2 степени лауреата Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» Министерства образования и науки РФ (студ. Леонова Е.В.).

6. Диплом 3 степени лауреата Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» Министерства образования и науки РФ (студ. Наумова И.А.).

7. Грамота участника Международной молодежной научной конференции XXXVI «Гагаринские чтения» Министерства образования и науки РФ (студ. Дериева А.Н.).

8. Грамота участника Международной молодежной научной конференции XXXVI «Гагаринские чтения» Министерства образования и науки РФ (студ. Леонова Е.В.).

9. Грамота участника Международной молодежной научной конференции XXXVI «Гагаринские чтения» Министерства образования и науки РФ (студ. Наумова И.А.).

10. Грамота участника Международной молодежной научной конференции XXXVI «Гагаринские чтения» Министерства образования и науки РФ (асп. Перепелкин А.А.).

11. Диплом участника первой ежегодной всероссийской студенческой научно-практической конференции «финансовые рынки будущего» (студ. Наумова И.А.).

**11. Сведения о выполнении целевых индикаторов и показателей  
федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры  
инновационной России» на 2009-2013 годы»**

**11.1. Список монографий, опубликованных в 2011 г.**

1. Яковлев С.С., Трегубов В.И. Теория и технология изготовления крупногабаритных осесимметричных деталей ответственного назначения из высокопрочных анизотропных материалов / под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 232с..
2. Яковлев С.С., Ларин С.Н., Трегубов В.И. Изотермическая пневмоформовка элементов ячеистых многослойных листовых конструкций из анизотропных высокопрочных материалов в режиме ползучести / под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 173 с.

**11.2. Список учебных пособий, опубликованных в 2011 г.**

1. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Платонов В.И., Недошивин С.В. Устойчивость стержневых конструкций: учеб. пособие / под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. 280 с.
2. Яковлев С.С., Ларин С.Н., Трегубов В.И., Ремнев К.С. Устойчивость пластинок: учеб. пособие / под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 200 с.

**11.3. Список учебно-методических статей, опубликованных в 2011 г.**

1. Научно-исследовательская работа студентов политехнического института в 2010 году: итоги и перспективы / С.Н. Ларин [и др.] // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2011. С. 3-5.
2. Ларин С.Н., Аверьянова И.Э., Воротынцев А.Ю. О мерах по обеспечению учебной дисциплины на механико-технологическом факультете // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2011. С. 12-14.

3. Ларин С.Н., Аверьянова И.Э., Судаков С.П. Модернизация механико-технологического факультета // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2011. С. 15-16.

4. Ларин С.Н., Яковлев С.С. Научно-исследовательская работа студентов на кафедре МПФ // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2011. С. 16-18.

5. Ларина М.В., Ларин С.Н. Охрана труда и окружающей среды в дипломном проектировании для специальности 150201 «Машины и технология обработки металлов давлением» // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2011. С. 19-20.

6. Тишин С.А., Ларин С.Н., Акимова М.В. Процесс адаптации студентов первого курса механико-технологического факультета // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2011. С. 30-31.

#### **11.4. Список статей, опубликованных в ведущих научных журналах в 2011 г.**

1. Яковлев С.С., Платонов В.И. Математическая модель операции реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из кристаллических анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 1. С. 89-94.

2. Грязев М.В., Яковлев С.С., Ларин С.Н. Математическая модель изотермического деформирования полусферических деталей из трансверсально-изотропных материалов в режиме ползучести // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 1. С. 27-36.

3. Яковлев С.С., Крылов Д.В. Математическая модель операции раздачи трубных заготовок из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 1. С. 79-88.

4. Яковлев С.С., Кухарь В.Д. Анизотропия механических свойств и кристаллографическая текстура гексагональных плотноупакованных металлов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 1. С. 43-49.

5. Дудка Д.В., Трегубов В.И. Влияние технологических параметров на образование наплыва при ротационной вытяжке осесимметричных деталей // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 1. С. 3-13.
6. Яковлев С.С., Кухарь В.Д. Текстура и структура сварных соединений гексагональных плотноупакованных титановых сплавов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 1. С. 37-42.
7. Трегубов В.И., Дудка Д.В., Яковлев С.С. Одномашинная технология изготовления полых осесимметричных сложнопрофильных деталей методом ротационной вытяжки и ротационного обжима // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 1. С. 21-26.
8. Яковлев С.С., Ремнев К.С. Оценка влияния анизотропии механических свойств трубных заготовок на технологические параметры раздачи // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 2. С. 502-513.
9. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Ремнев К.С. Математическая модель многооперационной вытяжки ступенчатых осесимметричных деталей из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 2. С. 409-416.
10. Ремнев К.С., Яковлев С.С. Технологические параметры операций обжима и раздачи трубных заготовок из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 2. С. 513-526.
11. Яковлев С.С., Платонов В.И. Силовые режимы операции реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из кристаллических анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 2. С. 537-541.
12. Ларин С.Н., Яковлев С.С., Грязев М.В. Оценка влияния анизотропии механических свойств заготовки на предельные возможности изотермического деформирования полусферических деталей в режиме ползучести // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 2. С. 394-398.

13. Яковлев С.С., Дудка Д.В., Суков М.В. Предельные возможности операции обратного выдавливания трубных заготовок из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 2. С. 471-478.
14. Коротков В.А., Полковников Д.Б., Терехов А.Ф. Метод диагностики привода кузнечно-штамповочного оборудования в процессе его эксплуатации прессы // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 3. С. 449-455.
15. Яковлев С.С., Дудка Д.В. Оценка влияния длительности отжига на текстуру листов из титанового сплава ПТ-3вкт // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 3. С. 400-403.
16. Яковлев С.С., Ремнев К.С. Многооперационная вытяжка полусферических тонкостенных днищ // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 3. С. 420-427.
17. Яковлев С.С., Платонов В.И., Нечепуренко Ю.Г. Предельные возможности операции реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из кристаллических анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 3. С. 463-469.
18. Ларин С.Н. Технологические параметры процесса формообразования куполообразных изделий из анизотропного материала в режиме ползучести // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 3. С. 469-476.
19. Дудка Д.В., Трегубов В.И. Влияние технологических параметров и вида термической обработки перед ротационной вытяжкой на механические свойства полуфабриката // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 3. С. 386-395.
20. Яковлев С.С., Коротков В.А. Изготовление полусферических днищ из малопластичных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 3. С. 427-432.
21. Яковлев С.С., Кухарь В.Д. Длительность отжига и текстура листов из сплава ПТ-3ВКТ // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 4. С. 23-26.

22. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Платонов В.И. Разностенность осесимметричных деталей с фланцем при реверсивной вытяжке кристаллических анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 4. С. 26-30.

23. Яковлев С.С., Кухарь В.Д. Разрушение полуфабриката при многооперационной вытяжке со структурой и текстурой титанового сплава // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 4. С. 18-23.

24. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Калашников А.Е. Влияние анизотропии механических свойств на образование складок при вытяжке осесимметричных деталей // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 4. С. 98-109.

25. Ларин С.Н. Изотермическое формоизменение куполообразных оболочек // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 4. С. 77-82.

26. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Фам Дык Тхиен. Вопросы теории штамповки ортотропных анизотропно-упрочняющихся материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 4. С. 130-135.

27. Яковлев С.С., Ремнев К.С. Математическая модель анизотропного упрочнения ортотропного материала, разнсопротивляющегося растяжению и сжатию // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 4. С. 91-98.

28. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Калашников А.Е. Энергетический критерий устойчивости анизотропной тонколистовой прямоугольной пластины // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 4. С. 114-123.

29. Яковлев С.С., Ремнев К.С. Критерий локальной потери устойчивости ортотропного анизотропно-упрочняющегося листа // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 4. С. 109-113.

30. Яковлев С.С., Ремнев К.С. Основные уравнения и соотношения пластического течения начально-ортотропного упрочняющегося, разнсопротивляющегося

материала // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 5. С. 147-151.

31. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Платонов В.И. Оценка величины повреждаемости осесимметричных деталей с фланцем из анизотропного материала при реверсивной вытяжке // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 5. С. 135-139.

32. Яковлев С.С., Ремнев К.С. Критерий шейкообразования ортотропного анизотропного упрочняющегося листового материала // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 5. С. 176-180.

33. Наумов Д.М., Вальтер А.И. Моделирование процесса ротационной вытяжки с утонением методом конечных элементов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 5. С. 139-147.

34. Кухарь В.Д., Киреева А.Е. Пути повышения эффективности функционирования магнитно-импульсных установок модульного типа // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 5. С. 122-127.

35. Кухарь В.Д., Киреева А.Е. Интенсификация процессов магнитно-импульсной штамповки путем управления формой разрядного импульса // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 5. С. 127-130.

36. Кухарь В.Д., Киреева А.Е. Математическое моделирование электромеханических процессов протекающих в индукторе для магнитно-импульсной штамповки // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 5. С. 130-135.

37. Яковлев С.С., Ларин С.Н., Чудин В.Н. Технологические процессы изотермического формообразования полусферических деталей // Кузнечно-штамповочное производство, 2011, №11, С. 26-29.

38. Кухарь В.Д., Яковлев С.С., Ремнев К.С. Влияние технологических параметров на образование складок при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала // Кузнечно-штамповочное производство, 2011, №11, С. 3-10.

39. Яковлев С.С., Ларин С.Н., Чудин В.Н. Технологические рекомендации по проектированию технологических процессов изготовления корпусных узлов из вы-

сокопрочных материалов // Кузнечно-штамповочное производство, 2011, №11, С. 24-29.

40. Грязев М.В., Пасько А.Н., Алексеев Д.А. Программа для расчета трехмерных процессов холодной штамповки // Кузнечно-штамповочное производство, 2011, №11, С. 41-45.

41. Пасько А.Н., Алексеев Д.А. Математическое моделирование процессов гидравлической и гидромеханической формовки // Кузнечно-штамповочное производство, 2011, №11, С. 45-48.

42. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Хвостов Е.Ю. Особенности многооперационной холодной штамповки остrokонечных стержневых соединительных элементов // Кузнечно-штамповочное производство, 2011, №11, С. 29-38.

43. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Пилипенко О.В., Ремнев К.С. Технологические параметры вытяжки с утонением стенки двухслойных анизотропных материалов // Кузнечно-штамповочное производство, 2011, №11, С. 17-21.

44. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Пилипенко О.В., Ремнев К.С. Ротационная вытяжка с утонением стенки трубных заготовок из анизотропного материала // Кузнечно-штамповочное производство, 2011, №11, С. 10-17.

45. Ларин С.Н. Изотермическая пневмоформовка полусферических деталей из анизотропного материала в режиме кратковременной ползучести // Известия вузов. Машиностроение. 2011, С. 21-25.

46. Ларин С.Н. Изотермическое деформирование элементов листовых конструкций цилиндрического и прямоугольного сечения в режиме кратковременной ползучести // Известия вузов. Машиностроение. 2011, С. 25-30.

47. Трегубов В.И., Яковлев С.С., Ремнев К.С. Технологические параметры вытяжки с утонением стенки цилиндрических деталей из двухслойных анизотропных материалов // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. Москва. Научный совет РАН. 2011. С. 58-64.

48. Трегубов В.И., Яковлев С.С. Ротационная вытяжка с утонением стенки трубных заготовок из анизотропного материала // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. Москва. Научный совет РАН. 2011. С. 72-78.

### **11.5. Список статей, опубликованных в межвузовских сборниках научных трудов в 2011 г.**

1. Дудка Д.В. Влияние анизотропии механических свойств на устойчивость стенки трубной заготовки // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 1. С. 162-165.

2. Дудка Д.В., Яковлев С.С., Трегубов В.И. Формирование показателей качества осесимметричных деталей из сплава АМг6 при ротационной вытяжке // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 1. С. 165-171.

3. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Крылов Д.В. Технологические параметры операции обжима анизотропных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 1. С. 171-179.

4. Калашников А.Е. Влияние технологических параметров на образование складок при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 1. С. 197-206.

5. Герасимов Д.В. Исследование образования напльва при ротационной вытяжке осесимметричных деталей // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2011. С. 78-80.

6. Герасимов Д.В. Технологические режимы ротационной вытяжки конических деталей из анизотропных материалов // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2011. С. 81-83.

7. Исаева А.Н. Теоретические исследования осесимметричной вытяжки с утонением стенки толстостенных заготовок из анизотропных материалов // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2011. С. 120-121.

8. Лазо А.А. Теоретические исследования реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из кристаллических анизотропных материалов // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2011. С. 144-146.

9. Лыков С.С. Теоретические исследования операции раздачи трубных заготовок из анизотропных материалов // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2011. С. 164-166.

10. Перепелкин А.А. Теоретические исследования формообразования ребер жесткости на плитах в режиме кратковременной ползучести // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2011. С. 217-219.

11. Рябкин Д.А. Математическая модель операции обратного выдавливания трубных заготовок из анизотропного материала // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2011. С. 242-244.

12. Фан Дык Тхиен Потеря устойчивости стенки трубной заготовки из анизотропного материала // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2011. С. 286-288.

#### **11.6. Список тезисов докладов, опубликованных в 2011 г.**

1. Леонова Е.В. Исследование процесса изотермического деформирования анизотропной листовой заготовки в матрице прямоугольного поперечного сечения в режиме кратковременной ползучести // VI-я магистерская научно-техническая конференция. Тула: ТулГУ, 2011. С. 130-131.

2. Наумова И.А. Исследование процесса изотермической пневмоштамповки элементов конструкций цилиндрического и трапециевидного сечения из анизотропных заготовок в режиме кратковременной ползучести // VI-я магистерская научно-техническая конференция. Тула: ТулГУ, 2011. С. 139-140.

3. Исаева А.Н. Исследование операции осесимметричной вытяжки с утонением стенки цилиндрических заготовок из анизотропных материалов // VI-я магистерская научно-техническая конференция. Тула: ТулГУ, 2011. С. 120-121.

#### **11.7. Список, поданных заявок на изобретение в 2011 г.**

1. Заявка на изобретение № 2009128344/02 от 21.07.2009. Многослойная ячеи-

стая конструкция и способ ее изготовления. Авторы: Коротков В.А., Яковлев С.С., Чудин В.Н., Яковлев С.П., Ларин С.Н., Соболев Я.А (получено положительное решение).

### **11.8. Список защит докторских диссертаций в 2011 г.**

1. Черняев Алексей Владимирович «Теория и технология изотермического деформирования осесимметричных деталей жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением.

### **11.9. Список защит кандидатских диссертаций в 2011 г.**

Количество защит кандидатских диссертаций – 4.

Количество защит магистерских диссертаций – 8.

1. Легейда Виталий Юрьевич «Формовка тонкостенных осесимметричных оболочек равномерным давлением деформирующей среды» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением.

2. Панов Андрей Александрович «Холодное пластическое формообразование сферических шайб на соискание ученой степени кандидат технических наук по специальности» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением.

3. Пасынков Андрей Александрович «Изотермическая штамповка осесимметричных заготовок из высокопрочных материалов в режиме кратковременной ползучести» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением.

4. Брагин Сергей Александрович «Изотермическое прямое и ортогональное выдавливание элементов трубопроводов из высокопрочных материалов в режиме кратковременной ползучести» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением.

5. Подготовлено 8 магистров по направлению «Технологические машины и оборудование», программам подготовки «Теория и технология штамповки анизотропных заготовок», «Высокоскоростные методы обработки металлов давлением» и «Высокоэффективные технологические процессы листовой и объемной штамповки».

### **11.10. Признание заслуг коллектива**

1. Присвоена премия Правительства Российской Федерации в области образования в 2011 году за научно-методическую работу «Научно-учебно-педагогический комплекс по подготовке кадров высшей квалификации в области инновационных и высоких технологий обработки металлов давлением» (д.т.н., проф. Яковлев С.С., д.т.н., проф. Кухарь В.Д.).

2. Диплом выставки научно-технического творчества молодежи, посвященный Дню Российской науки.

3. Диплом Союза научных и инженерных общественных организаций тульской области за активное участие в научно-исследовательской работе (студ. Исаева А.Н.).

4. Диплом Союза научных и инженерных общественных организаций тульской области за активное участие в научно-исследовательской работе (студ. Леонова Е.В.).

5. Диплом первой степени VI-ой магистерской научно-технической конференции (студ. Исаева А.Н.).

6. Подана заявка на региональный конкурс «инженер года - 2011» в версии «Профессиональные инженеры» в номинации «Машиностроение».

7. Объявлена благодарность за активное участие в конкурсе «Лучший молодой преподаватель ТулГУ» (к.т.н., доц., Платонов В.И.).

**12. Сведения о выполнении целевых индикаторов и показателей  
федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры  
инновационной России» на 2009-2013 годы»**

**12.1. Список монографий, опубликованных в 2012 г.**

Подготовлена к опубликованию монография

1. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Трегубов В.И. Теория и технология штамповки анизотропных материалов (монография) // под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. с.

**12.2. Список учебных пособий, опубликованных в 2012 г.**

1. Иванова Э.А., Трегубов В.И., Платонов В.И., Пасынков А.А. Специальные технологические процессы горячей обработки металлов давлением / под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. 160 с.

2. Соколов Э.М., Ларина М.В., Трегубов В.И., Ларин С.Н. Часть 6. Охрана труда и окружающей среды. Руководство по дипломному проектированию / под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. 125с.

**12.3. Список учебно-методических статей, опубликованных в 2012 г.**

1. Ларин С.Н., Судаков С.П., Аверьянова И.Э. Проблемы развития материальной базы механико-технологического факультета // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2012. С. 9-11.

2. Тишин С.А., Ларин С.Н., Акимова М.В. Итоги внеучебной и воспитательной работы механико-технологического факультета в 2011 г // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2012. С. 19-21.

#### 12.4. Список статей, опубликованных в ведущих научных журналах в 2012 г.

1. Черняев А.В., Перепелкин А.А., Чудин В.Н. Горячее выдавливание внутренних концевых утолщений на корпусах // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 1. С. 191-202.
2. Яковлев С.С., Ларин С.Н., Бессмертный А.В. Формообразование угловых элементов стрингерных листовых конструкций из анизотропного материала в режиме кратковременной ползучести // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 1. С. 202-212.
3. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Ремнев К.С. Технологический процесс изготовления полусферических деталей // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 1. С. 185-191.
4. Ларин С.Н., Яковлев С.С., Чудин В.Н., Леонова Е.В. Экспериментальные исследования изотермического формоизменения вафельных конструкций // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 1. С. 245-252.
5. Грязев М.В., Яковлев С.С., Ларин С.Н. Изотермическое деформирование полусферических деталей из листового материала с плоскостной анизотропией в режиме ползучести // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 1. С. 173-185.
6. Яковлев С.С., Фан Дык Тхиен, Платонов В.И., Нечепуренко Ю.Г. Экспериментальные исследования первой операции комбинированной вытяжки // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 1. С. 217-225.
7. Яковлев С.С., Ларин С.Н., Соболев Я.А., Пилипенко О.В. Механические характеристики титанового сплава ВТ23 при различных температурно-скоростных режимах деформирования // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 1. С. 225-231.
8. Ларин С.Н. Технологические рекомендации по проектированию технологических процессов изготовления корпусных узлов из высокопрочных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 1. С. 212-217.

9. Платонов В.И., Яковлев С.С., Черняев А.В. Предельные возможности вытяжки с утонением стенки анизотропного материала в режиме ползучести // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 2. С. 171-179.
10. Ларин С.Н., Яковлев Б.С., Пилипенко О.В. Изотермическая вытяжка коробчатых деталей из анизотропных материалов по схеме «овал-прямоугольник» // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 2. С. 188-196.
11. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Ремнев К.С., Талалаев А.К. Технологический процесс изготовления полуторовых днищ // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 2. С. 148-155.
12. Ларин С.Н., Яковлев С.С., Чудин В.Н., Леонова Е.В. Изотермическая пневмоформовка вафельных панелей и трубчатых конструкций // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 2. С. 196-202.
13. Яковлев С.С., Ларин С.Н., Чарин А.В. Влияние анизотропии механических свойств на напряженное и деформированное состояния заготовки при изотермическом деформировании полусферических деталей // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 2. С. 202-209.
14. Чудин В.Н., Пасынков А.А. Математическая модель операции выдавливания фланцевых утолщений в режиме кратковременной ползучести // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 3. С. 101-109.
15. Яковлев С.С., Ларин С.Н., Чудин В.Н. Изотермическая вытяжка квадратных коробок из анизотропных материалов по схеме «круг - выпуклый квадрат - квадрат» // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 3. С. 78-89.
16. Яковлев С.С., Ларин С.Н., Чудин В.Н. Технологические схемы изготовления двух- и трехслойных листовых конструкций // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 3. С. 119-126.
17. Яковлев С.С., Черняев А.В., Платонов В.И. Математическая модель операции изотермического прямого выдавливания в режиме кратковременной ползуче-

сти // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 3. С. 95-101.

18. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Ремнев К.С. Многооперационная вытяжка куполообразных тонкостенных деталей ответственного назначения // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 3. С. 144-151.

19. Яковлев С.С., Чудин В.Н., Черняев А.В., Перепелкин А.А. Набор краевого утолщения на корпусной заготовке при локальном нагреве // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 3. С. 89-95.

20. Яковлев С.С., Черняев А.В., Пасынков А.А. Математическая модель изотермической раздачи законцовок трубопроводов из высокопрочных анизотропных материалов в режиме кратковременной ползучести // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 4. С. 47-53.

21. Яковлев С.С., Платонов В.И., Трегубов В.И. Изменений текстуры куполообразных деталей в процессе многооперационной вытяжки // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 4. С. 53-60.

22. Яковлев С.С., Чудин В.Н., Соколов Я.А. Математическая модель ортогонального выдавливания элементов трубопроводов в режиме кратковременной ползучести // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 4. С. 60-67.

23. Яковлев С.С., Грязев М.В. Влияние технологических параметров на предельные возможности операции отбортовки плоских заготовок с отверстием из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 4. С. 72-78.

24. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Ремнев К.С. Предельные степени деформации при ротационной вытяжке с утонением стенки анизотропного материала // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 4. С. 78-85.

25. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Трегубов В.И. Технологические рекомендации по проектированию технологических процессов глубокой вытяжки полусферических днищ // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 4. С. 98-102.

26. Яковлев С.С., Грязев М.В., Ремнев К.С. Критерий устойчивости трубной заготовки из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 5. С. 3-11.
27. Ремнев К.С., Яковлев С.С., Грязев М.В. Закономерности влияния цилиндрической анизотропии механических свойств трубных заготовок на устойчивость в виде образования складок // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 5. С. 11-16.
28. Яковлев С.С., Исаева А.Н., Пилипенко О.В. Силовые режимы вытяжки с утонением стенки толстостенных цилиндрических заготовок из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 5. С. 16-25.
29. Яковлев С.С., Бессмертная Ю.В. Вытяжка цилиндрических деталей из анизотропных материалов по схеме «круг-цилиндр» // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 5. С. 25-31.
30. Яковлев С.С., Бессмертная Ю.В. Вытяжка коробчатых деталей из анизотропных материалов по схеме «цилиндр-квадрат» // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 5. С. 31-40.
31. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Трегубов В.И. Технологические процессы холодной штамповки полусферических тонкостенных днищ из титанового сплава // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 6. С. 5-12.
32. Яковлев С.С., Грязев М.В. Силовые и деформационные параметры операции отбортовки плоских заготовок с отверстием из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 6. С. 12-23.
33. Черняев А.В., Чудин В.Н., Пасынков А.А. Технологические режимы операции изотермической высадки краевых утолщений в режиме кратковременной ползучести // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 6. С. 28-33.

34. Исаева А.Н., Яковлев С.С. Математическое моделирование операции обратного выдавливания толстостенных анизотропных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 6. С. 33-41.

35. Исаева А.Н., Яковлев С.С. Подход к анализу процесса деформирования полых осесимметричных толстостенных заготовок из анизотропных материалов в коническом канале // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 6. С. 45-51.

36. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Судаков П.В. Разложение специальных цилиндрических функций по степеням переменных аргументов при интегральном преобразовании Лапласа-Карсона // Известия ТулГУ. Сер. Естественные науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 1. С. 51-60.

37. Панфилов Г.В., Судаков П.В. Анализ кинематических соотношений механизма подачи плоских круглых заготовок различного диаметра в штамп вырубки-пробивки // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 2. С. 127-133.

38. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Судаков П.В. Обоснование алгоритма интегрирования напряжений вдоль граничных линий скольжения в осесимметричных задачах теории пластичности // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 2. С. 135-144.

39. Панфилов Г.В., Судаков П.В. особенности проектирования универсального быстропереналаживаемого автоматизированного штампа для вырубки и пробивки кольцевых уплотнителей // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 3. С. 89-96.

40. Панфилов Г.В., Хвостов Е.Ю., Судаков П.В. Особенности аналитического построения полей линий скольжения в осесимметричных задачах теории пластичности // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 3. С. 167-174.

41. Яковлев С.С., Бессмертная Ю.В., Ларин С.Н. Влияние анизотропии механических свойств на силовые режимы вытяжки коробчатых деталей по схеме «овал-

прямоугольник» // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. (принята в печать).

42. Грязев М.В., Ремнев К.С., Яковлев С.С. Влияние коэффициента нормальной анизотропии трубных заготовок на устойчивость в виде образования складок // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. (принята в печать).

43. Яковлев С.С., Грязев М.В., Ремнев К.С. Предельные возможности деформирования при раздаче анизотропных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. (принята в печать).

44. Яковлев С.С., Грязев М.В., Ремнев К.С. Силовые режимы операции раздачи анизотропных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. (принята в печать).

45. Ларин С.Н., Яковлев С.С., Соболев Я.А. Термомеханические режимы деформирования элементов панелей вафельного типа // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. (принята в печать).

46. Яковлев С.С., Ларин С.Н., Чудин В.Н. Технологические режимы изготовления четырехслойных закрытых корпусных конструкций из высокопрочных листовых материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. (принята в печать).

47. Яковлев С.С., Фам Дык Тхиен, Нечепуренко Ю.Г., Коротков В.А. Интенсификация технологических процессов изготовления полых цилиндрических деталей // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. (принята в печать).

48. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Ларина М.В. Технологические параметры раздачи трубных заготовок из трансверсально-изотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. (принята в печать).

49. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Чудин В.Н., Перепелкин А.А. Выдавливание и сварка давлением ребрений в режиме кратковременной ползучести // Кузнечно-штамповочное производство, 2012, №12, С. (принята в печать).

50. Черняев А.В., Перепелкин А.А., Чудин В.Н. Горячее выдавливание внутренних концевых утолщений на корпусах в режиме кратковременной ползучести // Кузнечно-штамповочное производство, 2012, №12, С. (принята в печать).
51. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Ремнев К.С. Механические свойства изготавливаемых деталей ротационной вытяжкой // Кузнечно-штамповочное производство, 2012, №12, С. (принята в печать).
52. Грязев М.В., Яковлев С.С., Трегубов В.И., Ремнев К.С. Технологии изготовления полых осесимметричных сложнопрофильных деталей // Кузнечно-штамповочное производство, 2012, №12, С. (принята в печать).
53. Кухарь В.Д., Проскуряков Н.Е., Петрова А.В. Математическая модель формирования полуторовой детали при вытяжке плоской заготовки // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 4. С. 39-47.
54. Булатов Л.А., Бертяев В.Д., Киреева А.Е. Динамическое поведение плоских шарнирных механизмов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 6. С. 23-28.
55. Булатов Л.А., Бертяев В.Д., Киреева А.Е. Кинематическое исследование шарнирно-рычажных механизмов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 6. С. 41-45.
56. Семенова Л.П., Серегина В.А., Пасько А.Н. Трёхмерное моделирование процесса выдавливания оживальной головной части // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. (принята в печать).
57. Кухарь В.Д., Киреева А.Е. Повышение эффективности сборочных операций импульсным магнитным полем путем обоснования выбора энергетических режимов // Кузнечно-штамповочное производство, 2012, №11, С. (принята в печать).
58. Семёнова Л.П., Пасько А.Н. Моделирование процесса высадки головных частей // Кузнечно-штамповочное производство, 2012, №11, С. (принята в печать).
59. Ткач О.А., Пасько А.Н., Семенова Л.П. Осадка заготовки в кольцевую матрицу // Кузнечно-штамповочное производство, 2012, №11, С. (принята в печать).

60. Пасько А.Н., Ткач О.А., Семенова Л.П. Исследование процесса осадки кольцевой заготовки без оправки // Кузнечно-штамповочное производство, 2012, №11, С. (принята в печать).

### **12.5. Список статей, опубликованных в межвузовских сборниках научных трудов в 2012 г.**

1. Перепелкин А.А., Черняев А.В. Изотермическое выдавливание внутренних утолщений на осесимметричных деталях // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. 89-97.

2. Грязев М.В., Ларин С.Н., Яковлев С.С. Предельные возможности изотермического деформирования полусферических деталей из анизотропного материала в условиях ползучего течения // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. 23-27.

3. Яковлев С.С., Ларин С.Н. Влияние технологических параметров на силовые и деформационные параметры изотермического деформирования полусферических деталей из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. 124-131.

4. Яковлев С.С., Фан Дык Тхиен, Нечепуренко Ю.Г. Экспериментальные исследования последующих операций комбинированной вытяжки // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. 142-147.

5. Яковлев С.С., Фан Дык Тхиен, Платонов В.И. Технологические параметры первой операции комбинированной вытяжки цилиндрических деталей из анизотропного упрочняющегося материала // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. 147-156.

6. Платонов В.И., Яковлев С.С. Силовые режимы операции вытяжки с утонением стенки анизотропного материала в режиме ползучести // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. 97-105.

7. Яковлев С.С., Ларин С.Н., Яковлев Б.С. Изотермическая вытяжка коробчатых деталей по схеме «овал-овал» из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. 131-138.
8. Чудин В.Н., Перепелкин А.А., Черняев А.В. Математическая модель операции набор краевого утолщения на корпусной заготовке при локальном нагреве // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. 120-124.
9. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Ремнев К.С. Неоднородность механических свойств материала детали при ротационной вытяжке с утонением стенки // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 8. С. 138-142.
10. Ларин С.Н., Аверьянова И.Э. Работа механико-технологического факультета за 2011 г // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2012. С. 7-9.
11. Бессмертная Ю.В. Вытяжка коробки из заготовки прямоугольной формы с угловыми радиальными закруглениями // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2012. С. 35-37.
12. Бессмертная Ю.В., Матасов И.И. Вытяжка коробчатых деталей по схеме «овал-овал» из анизотропных материалов // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2012. С. 37-39.
13. Бессмертный А.В. Изотермическое стесненное деформирование элементов стрингерных листовых конструкций // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2012. С. 39-41.
14. Исаева А.Н. Силовые режимы операции вытяжки с утонением стенки анизотропного материала в режиме ползучести // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2012. С. 79-81.
15. Калашников А.Е. Гофрообразование фланца анизотропной заготовки при вытяжке // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2012. С. 81-83.

16. Корнюшина М.В. Неоднородность интенсивности деформации и напряжений при ротационной вытяжке с утонением стенки // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2012. С. 96-98.

17. Лазо А.А. Силовые и деформационные параметры изотермического деформирования полусферических деталей из анизотропного материала// Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2012. С. 103-105.

18. Леонова Е.В. Технологические параметры изотермического деформирования полусферических деталей из анизотропного материала // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2012. С. 105-107.

19. Лыков С.С. Ортогональное горячее выдавливание // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2012. С. 107-109.

20. Перепелкин А.А. Выдавливание внутренних утолщений на осесимметричных деталях в режиме кратковременной ползучести // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2012. С. 141-143.

21. Перепелкин А.А. Набор краевого утолщения на корпусной заготовке при локальном нагреве // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2012. С. 143-145.

22. Фан Дык Тхиен Последующие операции комбинированной вытяжки // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2012. С. 192-194.

#### **12.6. Список статей, опубликованных в международных сборниках научных трудов в 2012 г.**

1. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Калашников А.Е. Потеря устойчивости фланца анизотропной заготовки при вытяжке осесимметричных деталей // Обработка материалов давлением. Украина. Краматорск, 2012. №1 (30). С. 156-164.

2. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Ремнев К.С. Предельные степени деформации при ротационной вытяжке с утонением стенки анизотропного материала // Обработка материалов давлением. Украина. Краматорск, 2012. № 2 (51). С. 34-40.

3. Кухарь В.Д., Киреева А.Е., Ларин С.Н. Разработка научно-обоснованной методики проектирования формы спирали индуктора-концентратора для обжима // Обработка материалов давлением. Украина. Краматорск, 2012. № 2 (31). С. 231-235.

#### **12.7. Список тезисов докладов, опубликованных в 2012 г.**

1. Бессмертный А.В. Изотермическое формообразование угловых элементов стрингерных листовых конструкций из высокопрочных анизотропных материалов // XXXVIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2012. С. 235-237.

2. Калашников А.Е. Потеря устойчивости фланца листовой анизотропной заготовки при вытяжке // XXXVIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2012. С. 259-261.

3. Перепелкин А.А. Выдавливание внутренних концевых утолщений на корпусах в режиме кратковременной ползучести // XXXVIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2012. С. 309-311.

4. Исаева А.Н. К оценке предельных возможностей изотермической вытяжки с утонением стенки анизотропного материала // XXXVIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2012. С. 257-259.

5. Лазо А.А. Напряженное и деформированное состояния заготовки при изотермической пневмоформовки полусферических деталей // XXXVIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2012. С. 282-284.

6. Леонова Е.В. Проектирование технологических процессов изготовления корпусных узлов из высокопрочных материалов // XXXVIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2012. С. 284-286.

7. Леонова Е.В. Пневмоформовка вафельных панелей и трубчатых конструкций // XXXVIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2012. С. 287-289.

8. Лыков С.С. Ортогональное горячее выдавливание // XXXVIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2012. С. 289-291.

9. Лаврушина Г.В. Изготовление полусферических деталей из высокопрочных материалов // XXXVIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2012. С. 280-282.

10. Перепелкин А.А. К оценке предельных возможностей горячего выдавливания внутренних концевых утолщений на корпусах // XXXVIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2012. С. 307-309.

11. Корнюшина М.В. Технология изготовления полуторовых днищ // XXXVIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2012. С. 270-272.

12. Фан Дык Тхиен Исследования силовых и деформационных параметров первой операции комбинированной вытяжки // XXXVIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2012. С. 325-327.

13. Матасов И.И. Вытяжка коробчатых деталей из анизотропных материалов по схеме «овал-прямоугольник» в режиме кратковременной ползучести // XXXVIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2012. С. 295-297.

14. Бессмертная Ю.В. Технологические параметры вытяжки коробки с малыми угловыми радиусами // XXXVIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МАТИ, 2012. С. 233-235.

## **12.8. Список, поданных заявок на изобретение в 2012 г.**

1. Подана заявка на изобретение №2012131813 от 24.07.2012 МПК 8 **B21J5/12**. Способ и устройство для изготовления ребристых панелей / Коротков В.А., Яковлев С.С., Чудин В.Н., Ларин С.Н., Пасынков А.А., Перепелкин А.А.

## **12.9. Список защит докторских диссертаций в 2012 г.**

1. Ларин Сергей Николаевич «Изотермическое деформирование листовых заготовок из высокопрочных анизотропных материалов в режиме кратковременной ползучести» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением (защита состоится после утверждения диссертационного совета в ВАКе Российской Федерации).

## **12.10. Список защит кандидатских диссертаций в 2012 г.**

Количество защит кандидатских диссертаций – 2.

Количество защит магистерских диссертаций – 8.

1. Перепелкин Алексей Алексеевич «Изотермическое выдавливание ребристых и утолщений на корпусных деталях в режиме кратковременной ползучести» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением (защита состоится после утверждения диссертационного совета в ВАКе Российской Федерации).

2. Бессмертный Алексей Викторович «Изотермическое деформирование элементов многослойных листовых конструкций из высокопрочных анизотропных материалов в режиме кратковременной ползучести» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением (защита состоится после утверждения диссертационного совета в ВАКе Российской Федерации).

3. Подготовлено 8 магистров по направлению «Технологические машины и

оборудование», программам подготовки «Теория и технология штамповки анизотропных заготовок», «Высокоскоростные методы обработки металлов давлением» и «Высокоэффективные технологические процессы листовой и объемной штамповки».

### **12.11. Признание заслуг коллектива**

1. Д.т.н., проф. Яковлев С.С. награжден Знаком почета «Союза научных и инженерных общественных объединений Тульской области» (2012 г.).
2. Д.т.н., проф. Кухарь В.Д. награжден Знаком почета «Союза научных и инженерных общественных объединений Тульской области» (2012 г.).
3. Д.т.н., проф. Яковлев С.С. награжден Юбилейной медалью «300-летие начала Государственного оружейного производства в г. Туле» (2012 г.).
4. Д.т.н., проф. Кухарь В.Д. награжден Юбилейной медалью «300-летие начала Государственного оружейного производства в г. Туле» (2012 г.).
5. Д.т.н., проф. Панфилов награжден Юбилейной медалью «300-летие начала Государственного оружейного производства в г. Туле» (2012 г.).
6. К.т.н., доц. Коротков В.А. награжден Почетной грамотой Министерства образования и науки РФ (2012 г.).
7. Д.т.н., проф. Панфилов награжден Почетной грамотой администрации города Тулы (2012 г.).
8. Д.т.н., проф. Яковлев С.С. награжден Почетной грамотой Тульской областной Думы (2012 г.).
9. Д.т.н., доц. Черняев А.В. награжден Почетной грамотой Тульского государственного университета.
10. К.т.н., доц. Платонов В.И. награжден Почетной грамотой Политехнического института Тульского государственного университета.
11. Победителем регионального конкурса «Инженер года-2011» по версии «Инженерное искусство молодых» в номинации «Полиграфия» была признана кандидат технических наук, доцент Агеева Анастасия Игоревна.

12. Победителем регионального конкурса «Инженер года-2011» по версии «Профессиональные инженеры» в номинации «Машиностроение» был признан кандидат технических наук, доцент Ларин Сергей Николаевич.
13. Получено свидетельство №05-00595 эксперта в научно-технической сфере (Яковлев С.С.).
14. Подана заявка на региональный конкурс «Инженер года - 2012» в версии «Профессиональные инженеры» в номинации «Машиностроение» (к.т.н., доц., Платонов В.И.).
15. Объявлена благодарность за активное участие в конкурсе «Лучший молодой преподаватель ТулГУ» (к.т.н., доц., Пасынков А.А.).
16. Получена грамота лауреата международной молодежной научной конференции «XXXVIII Гагаринские чтения» (студент Лыков С.С.).
17. Получена грамота лауреата международной молодежной научной конференции «XXXVIII Гагаринские чтения» (студент Лазо А.И.).
18. Получена грамота лауреата международной молодежной научной конференции «XXXVIII Гагаринские чтения» (студент Матасов И.И.).
19. Получен диплом «Преподаватель высшей школы» (Миронова О.А.).
20. Получена стипендия им. Сергея Петровича Яковлева (за хорошую учёбу и достижения в научно-исследовательской работе) (Корнюшина М.В.).
21. Получен диплом 3-й степени Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (Бессмертная Ю.В.).
22. Получен диплом 3-й степени Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (Леонова Е.В.).

### 13. Достижение Программных индикаторов и показателей

Индикатор		Требование Государственного контракта			Выполнение нарастающим итогом на конец отчетного этапа	Обоснование достижимости
Обозн.	Наименование	Ед. изм.	Значение	Срок достижения		
И.1.1.1.	Количество кандидатов наук – исполнителей НИР, представивших докторские диссертации в диссертационный совет (нарастающим итогом)	чел.	2	15.11.12	3	Полицарпов Евгений Юрьевич «Научное обоснование технологических решений изготовления крупногабаритных осесимметричных деталей ответственного назначения из высокопрочных анизотропных материалов» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением, защита в 2010; Черняев Алексей Владимирович «Теория и технология изотермического деформирования осесимметричных деталей жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести» по специальности 05.02.09 Технологии и машины обработки давлением, защита в 2011; Ларин Сергей Николаевич «Изотермическое деформирование листовых заготовок из высокопрочных анизотропных материалов в режиме кратковременной ползучести» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением (защита состоится после утверждения диссертационного совета в ВАКе Российской Федерации).
И.1.1.2.	Количество аспирантов – исполнителей НИР, представивших кандидатские диссертации в диссертационный совет (нарастающим итогом)	чел.	4	15.11.12	8	Полухин Дмитрий Сергеевич «Изотермическое обратное выдавливание трубных заготовок из высокопрочных анизотропных материалов в режиме кратковременной ползучести» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением, защита в 2010. 2. Драбик Андрей Николаевич «Ротационная вытяжка конических деталей из анизотропных заготовок» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением, защита в 2010.

						<p>3. Легейда Виталий Юрьевич «Формовка тонкостенных осесимметричных оболочек равномерным давлением деформирующей среды» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением, защита в 2011.</p> <p>4. Панов Андрей Александрович «Холодное пластическое формообразование сферических шайб на соискание ученой степени кандидат технических наук по специальности» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением, защита в 2011.</p> <p>5. Пасынков Андрей Александрович «Изотермическая штамповка осесимметричных заготовок из высокопрочных материалов в режиме кратковременной ползучести» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением, защита в 2011.</p> <p>6. Брагин Сергей Александрович «Изотермическое прямое и ортогональное выдавливание элементов трубопроводов из высокопрочных материалов в режиме кратковременной ползучести» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением, защита в 2011.</p> <p>7. Перепелкин Алексей Алексеевич «Изотермическое выдавливание орэбрений и утолщений на корпусных деталях в режиме кратковременной ползучести» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением (защита состоится после утверждения диссертационного совета в ВАКе Российской Федерации).</p> <p>8. Бессмертный Алексей Викторович «Изотермическое деформирование элементов многослойных листовых конструкций из высокопрочных анизотропных материалов в режиме кратковременной ползучести» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обра-</p>
--	--	--	--	--	--	---

						ботки давлением (защита состоится после утверждения диссертационного совета в ВАКе Российской Федерации).
И.1.1.3.	Количество студентов, аспирантов, докторантов и молодых исследователей, закрепленных в сфере науки, образования и высоких технологий (зачисленных в аспирантуру или принятых на работу в учреждения высшего профессионального образования, научные организации, предприятия оборонно-промышленного комплекса, энергетической, авиационно-космической, атомной отраслей и иных приоритетных для Российской Федерации отраслей промышленности) в период выполнения НИР (нарастающим итогом)	чел.	10	15.11.12	23	Аспирант Полухин Дмитрий Сергеевич; аспирант Брагин Сергей Александрович; аспирант Драбик Андрей Николаевич; аспирант Бессмертный Алексей Викторович; аспирант Бессмертная Юлия Вячеславовна; аспирант Перепелкин Алексей Алексеевич; аспирант Легейда Вадим Юрьевич; аспирант Леонова Евгения Витальевна; аспирант Исаева Анна Николаевна; ведущий инженер патентного отдела, соискатель Миронова Ольга Александровна; к.т.н. доцент, докторант Ларин Сергей Николаевич; к.т.н. доцент Ларина Марина Викторовна; к.т.н. доцент Платонов Валерий Иванович; к.т.н. доцент, докторант Ремнев Кирилл Сергеевич; к.т.н. доцент Киреева Алена Евгеньевна; к.т.н. доцент Агеева Анастасия Игоревна; к.т.н. доцент Яковлев Борис Сергеевич; к.т.н. доцент Крылов Дмитрий Валериевич; к.т.н. доцент Ивутин Алексей Николаевич; к.т.н. доцент Пасынков Андрей Александрович; магистрант Лыков Сергей Сергеевич; магистрант Лазо Андрей Анатольевич; магистрант Бойко Оксана Анатольевна
И.1.1.4.	Количество исследователей – исполнителей НИР, результаты работы которых в рамках НИР опубликованы в высокорейтинговых российских и зарубежных журналах	чел.	6	15.11.12	24	Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Киреева А.Е., Черняев А.В., Полухин Д.С., Драбик А.Н., Панфилов Г.В., Чудин В.Н., Пасынков А.А., Перепелкин А.А., Ларин С.Н., Платонов В.И., Бессмертная Ю.В., Пасько А.Н., Легейда В.Ю., Крылов Д.В., Ремнев К.С., Коротков В.А., Бессмертный А.В., Леонова Е.В., Яковлев Б.С., Исаева А.Н., Ларина М.В., Евдокимов А.К.
П.1.1.1.	Количество докторов наук – исполнителей НИР, работающих в научной или образовательной организации на полную ставку, принявших участие в работах в течение	чел.	8	15.11.12	8	Яковлев С.С., Матченко Н.М., Кухарь В.Д., Матченко И.Н., Панфилов Г.В., Пасько А.Н., Черняев А.В., Евдокимов А.К.

	всего срока реализации НИР					
П.1.1.2.	Количество молодых кандидатов наук – исполнителей НИР, работающих в научной или образовательной организации на полную ставку, принявших участие в работах в течение всего срока реализации НИР (как правило, соискателей ученой степени доктора наук)	чел.	8	15.11.12	10	Ларин С.Н., Ларина М.В., Платонов В.И. Ремнев К.С. Киреева А.Е. Агеева А.И. Яковлев Б.С. Крылов Д.В. Ивутин А.Н. Пасынков А.А.
П.1.1.3.	Количество аспирантов, принявших участие в работах в течение всего срока реализации НИР	чел.	5	15.11.12	11	Полухин Д.С., Пасынков А.А. Брагин С.А. Драбик А.Н. Бессмертный А.В. Бессмертная Ю.В. Перепелкин А.А. Легейда В.Ю. Леонова Е.В. Исаева А.Н. Панов А.А.
П.1.1.4.	Количество студентов, принявших участие в работах в течение всего срока реализации НИР	чел.	5	15.11.12	10	Леонова Е.В. Исаева А.Н. Наумова И.А. Золотухин М.Ю. Лыков С.С. Лазо А.А. Бойко О.А. Матасов И.И. Карнюшина М.В. Лаврушина Г.В. Золотухин М.Ю.
П.1.1.5.	Доля привлеченных на реализацию НИР внебюджетных средств от объема средств федерального бюджета	%	20 %	15.11.12	20,0%	Внебюджетные средства
П.1.1.6.	Доля фонда оплаты труда молодых участников НИР (молодых кандидатов наук, аспирантов и студентов) в общем объеме фонда оплаты труда по НИР	%	50 %	15.11.12	50,0%	Фонд оплаты молодых участников НИР (ежегодно)

Примечание: сведения о достижении индикаторных показателей представлены в разделах 10-12, копии справок, статей, монографий, авторефератов прилагаются.

## Заключение

Цель выполнения работы - научное обоснование и внедрение высоких технологий изготовления корпусных деталей сложной формы (полусферических и полукорпусных днищ) ответственного назначения из высокопрочных кристаллических материалов методами пластического формообразования путем повышения пластической деформируемости листовых кристаллических материалов на базе изменения кристаллографической текстуры и характеристик анизотропии механических свойств, путем совершенствования технологий формообразования и термообработки при изготовлении. Подготовка научных кадров для машиностроительных предприятий и научно-исследовательских учреждений центрального региона и научно-педагогических кадров для высших учебных заведений, формирование эффективных и жизнеспособных научных коллективов.

В процессе теоретического и экспериментального исследований получены следующие основные результаты и сделаны выводы:

1. На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны научно обоснованные технологические решения изготовления крупногабаритных осесимметричных деталей с фланцем многооперационной вытяжкой полусферических днищ применительно к изготовлению деталей и узлов ракетно-космической техники, созданы технологические принципы разработки новых наукоемких технологических процессов изготовления крупногабаритных тонкостенных полусферических днищ из высокопрочных кристаллических материалов, методики по расчету технологических параметров многооперационной ступенчатой вытяжки без утонения стенки. Разработан новый технологический процесс холодной штамповки заготовок для изготовления полусферических днищ из высокопрочного титанового сплава ПТ-3Вкт толщиной 3,5 мм с геометрическими соотношениями  $s/D < 0,003$  и  $H/D = 0,5$ , основанный на методе ступенчатого набора в универсальных сборных переналаживаемых штампах с последующей калибровкой и химическим фрезерованием. При холодной штамповке листового материала в универсальных штампах (матричных кольцах) нет необходимости в дорогостоящих штампах с

обогревом, значительно повышается культура производства, снижается травматизм. Холодная штамповка более экономична с точки зрения энергозатрат. По сравнению с вариантом получения титановых полусферических днищ механической обработкой заготовок, полученных методом горячей объемной штамповки, способ позволяет снизить трудоемкость механической обработки с 20 смен до 2 часов.

2. Создан наукоемкий технологический процесс изготовления заготовок детали «диафрагма» под калибровку и последующую ротационную вытяжку из алюминиевого сплава А5М толщиной 3,5 мм с геометрическими соотношениями  $s/D < 0,003$  и  $H/D = 0,5$  методом ступенчатого набора. Новые технологические процессы ступенчатой вытяжки приняты к внедрению в производство на закрытом акционерном обществе «Завод экспериментального машиностроения ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королева». Новые технологические процессы обеспечивают: увеличение удельной прочности в 1,5...1,7 раз; уменьшение массы в 1,5 раз; снижение трудоемкости в 2...3 раз; увеличение коэффициента использования материала с 0,3 до 0,9; сокращение сроков подготовки производства новых изделий в 2 раза.

3. На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны научно обоснованные технологические решения изготовления крупногабаритных полуторовых днищ реверсивной вытяжкой применительно к изготовлению деталей и узлов ракетно-космической техники, рекомендации по расчету технологических параметров процесса реверсивной вытяжки полуторовых днищ. Результаты этих работ использованы при проведении научно-исследовательских и технологических работ по совершенствованию технологического процесса изготовления полуфабрикатов полуторовых деталей из тонколистового алюминиевого сплава АМг6. Технологический процесс обеспечивает изготовление полуторовых днищ с минимальной величиной разностенности (до 8 %), заданную величину степени использования ресурса пластичности, эксплуатационные требования и снижение трудоемкости их изготовления, сокращение сроков подготовки производства. При штамповке в холодную в универсальных штампах (матричных кольцах) нет необходимости в дорогостоящих штампах с обогревом, значительно повышается куль-

тура производства, снижается травматизм. Холодная штамповка более экономична с точки зрения энергозатрат.

4. По результатам научных исследований в 2012 году опубликованы две монографии, опубликованы и подготовлены к опубликованию 60 научных работ в ведущих научных журналах, рекомендуемых ВАК Российской Федерации; 25 статей в межвузовских сборниках научных трудов, а также опубликовано 14 тезиса докладов в сборниках трудов международных и Всероссийских научно-технических конференций. Проведены патентные исследования. Подана заявка на изобретение №2012131813 от 24.07.2012 МПК 8 В21J5/12. Способ и устройство для изготовления ребристых панелей / Коротков В.А., Яковлев С.С., Чудин В.Н., Ларин С.Н., Пасынков А.А., Перепелкин А.А.

5. По результатам научно-исследовательской работы подготовлены к защите одна докторская диссертационная работа и две кандидатские диссертационные работы по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением. Подготовлено 8 магистров по направлению «Технологические машины и оборудование», программам подготовки «Теория и технология штамповки анизотропных заготовок», «Высокоскоростные методы обработки металлов давлением» и «Высокоэффективные технологические процессы листовой и объемной штамповки».

6. Результаты научно-исследовательской работы использованы при модернизации учебных планов подготовки бакалавров техники и технологии направления 150700 «Машиностроение» профиль «Машины и технология обработки металлов давлением» и студентов, обучающихся по направлению 150200 «Машиностроительные технологии и оборудование» специальности 150201 «Машины и технология обработки металлов давлением», при выполнении курсовых работ и дипломных проектов, а также учебных планов подготовки магистров по направлениям подготовки 150400 «Технологические машины и оборудование» программ подготовки: 15040039 "Теория и технология штамповки анизотропных материалов", 15040041 «Высокоэффективные технологические процессы листовой и объемной штамповки», 15040040 «Высокоскоростные методы обработки металлов давлением».

7. Отдельные результаты исследований использованы при разработке мето-

дических указаний по проведению лабораторных работ по курсу «Теория обработки металлов давлением» в виде новых занятий, при создании конспекта лекций по дисциплине «Физические основы пластической деформации», при выполнении курсовых работ и дипломных проектов.

8. На базе кафедры «Механика пластического формоизменения» ГОУ ВПО «Тульский государственный университет» проведена Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (Тула: ТулГУ, 2012 г.).

9. Исполнителями НИР опубликованы 2 научно-методические статьи.

10. По результатам научных исследований опубликованы два учебных пособия.

11. Разработана программа внедрения результатов НИР в образовательный процесс.

## Список использованных источников

1. А.с. №227619 СССР. Способ изготовления днищ топливных баков из титановых сплавов/ Е.Ю. Поликарпов [и др.]. (СССР) 1985. 1 с.
2. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
3. Адамеску Р.А., Гельд П.В., Митюшков Е.А. Анизотропия физических свойств металлов. М.: Metallurgy, 1985. 136 с.
4. Арышенский Ю.М., Гречников Ф.В. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов. М.: Metallurgy, 1990. 304 с.
5. Ашкенази Е.К. Анизотропия машиностроительных материалов. Л.: Машиностроение, 1969. 112 с.
6. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. 329 с.
7. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Metallurgy, 1984. 144 с.
8. Валиев С.А. Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов. М.: Машиностроение, 1973. 176 с.
9. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. 984 с.
10. Головлев В.Д. Расчет процессов листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1974. 136 с.
11. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 1998. 446 с.
12. Дель Г.Д. Технологическая механика. М.: Машиностроение, 1978. 174 с.
13. Демин В.А. Проектирование процессов тонколистовой штамповки на основе прогнозирования технологических отказов. М.: Машиностроение, 2002. 186 с.

14. Ковка и штамповка: справочник. В 4-х т. // Ред. совет: Е.И. Семенов [и др.]. т. 4. Листовая штамповка / под ред. А.Д. Матвеева. М.: Машиностроение, 1987. 544 с.
15. Ковка и штамповка: справочник: В 4-х т. Т. 4. Листовая штамповка / под общ. ред. С.С. Яковлева; ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) [и др.]. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2010. 732 с.
16. олмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет (УПИ), 2001. 836 с.
17. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.
18. Колмогоров В.Л., Мигачев Б.А., Бурдуковский В.Г. Феноменологическая модель накопления повреждений и разрушения при различных условиях нагружения. Екатеринбург: УрОРАМ, 1994. 104 с.
19. Кудрявцев И.П. Текстуры в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1965. 292 с.
20. Лемешев П.В. Производственный опыт разработки прогрессивных техпроцессов штамповки тонколистовых деталей. М.: Изд-во НПО «Энергия», 1983. 60 с.
21. Листовая штамповка: расчет технологических параметров: справочник / В.И. Ершов [и др.]. М.: Изд-во МАИ, 1999. 516 с.
22. Малоотходная, ресурсосберегающая технология штамповки / под ред. В.А. Андрейченко, Л.Г. Юдина, С.П. Яковлева. Кишинев: Universitas. 1993. 240с.
23. Мельников Э.Л. Холодная штамповка днищ. М.: Машиностроение, 1986. 192 с.
24. Микляев П.Г., Фридман Я.Б. Анизотропия механических свойств металлов. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
25. Нечепуренко Ю.Г., Яковлев С.П., Яковлев С.С. Глубокая вытяжка цилиндрических изделий из анизотропного материала. Тула: ТулГУ, 2000. 195 с.
26. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Вища школа, 1983. 175 с.

27. Развитие теории пластического формообразования кристаллических ортотропных материалов с деформационной анизотропией механических свойств. Государственный контракт № 14.740.11.0038 от 01 сентября 2010 г. «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области создания и обработки кристаллических материалов», в рамках мероприятия 1.1 «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров» федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы»: промежуточ. отчет о НИР. Тула: ТулГУ; Руководитель С.С. Яковлев. 2010. 206 с., 1 ч., 10 рис., 198 источников, 1 прил.

28. Развитие теории пластического формообразования кристаллических ортотропных материалов с деформационной анизотропией механических свойств. Государственный контракт № 14.740.11.0038 от 01 сентября 2010 г. «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области создания и обработки кристаллических материалов», в рамках мероприятия 1.1 «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров» федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы»: промежуточ. отчет о НИР. Тула: ТулГУ; Руководитель С.С. Яковлев. 2011. 206 с., 1 ч., 10 рис., 198 источников, 2 прил.

29. Пат. 2392079 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 21 D 22/02. Способ штамповки тонкостенных полусферических днищ и устройство для его осуществления / Дятченко В.Ю., Дериева А.Н., Коротков В.А., Поликарпов Е.Ю., Яковлев С.С.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тульский государственный университет». № 2008140592; опубл. 20.06.2010. Бюл. № 17. 8 с.

30. Поликарпов Е.Ю. Влияние длительности отжига на текстуру листов из сплава ПТ-3Вкт // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2009. Вып. 2. С. 128-131.

31. Поликарпов Е.Ю. Проектирование технологических процессов изготовления полуторовых днищ // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2009. Вып. 3. С. 12-19.

32. Поликарпов Е.Ю. Реверсивная вытяжка осесимметричных деталей с

фланцем из анизотропных материалов // Обработка материалов давлением (Обработка материалов тиском): сборник научных трудов. Украина, Краматорск: ДГМА. 2009. №2 (21). С. 161-169.

33. Поликарпов Е.Ю. Штамповка полусферических тонкостенных днищ // Заготовительные производства в машиностроении (Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). 2009. №11. С. 15-18.

34. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. М.: Металлургия, 1982. 584 с.

35. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1968. 283 с.

36. Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 480 с.

37. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки / Ф.В. Гречников [и др.]; под ред. А.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1985. 184 с.

38. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.

39. Смирнов В.С., Дурнев В.Д. Текстурирование при прокатке. М.: Металлургия, 1971. 254 с.

40. Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1979. 215 с.

41. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.

42. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Голенков [и др.]; под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева, С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.

43. Теория образования текстур в металлах и сплавах / Я.Д. Вишняков [и др.] / М: Наука, 1979.

44. Технология конструкционных материалов (Технологические процессы в машиностроении): учебник для студентов машиностроительных специальностей ву-

зов. В 4 ч. Ч. 3. Производство заготовок / С.П. Яковлев [и др.]. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. 582 с.

45. Хван Д.В. Технологические испытания металлов. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1992. 152 с.

46. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М.: ГИТТЛ, 1956. 408 с.

47. Шевелев В.В., Яковлев С.П. Анизотропия листовых материалов и ее влияние на вытяжку. М.: Машиностроение, 1972. 136 с.

48. Шофман Л.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки. М.: Машиностроение, 1964. 365 с.

49. Яковлев С.П., Кухарь В.Д. Штамповка анизотропных заготовок. М.: Машиностроение, 1986. 136 с.

50. Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А. Обработка давлением анизотропных материалов. Кишинев: Квант, 1997. 331 с.

51. Яковлев С.С., Дудка Д.В. Оценка влияния длительности отжига на текстуру листов из титанового сплава ПТ-3вкт // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 3. С. 400-403.

52. Яковлев С.С., Коротков В.А. Изготовление полусферических днищ из малопластичных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 3. С. 427-432.

53. Яковлев С.С., Кухарь В.Д. Длительность отжига и текстура листов из сплава ПТ-3ВКТ // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 4. С. 23-26.

54. Яковлев С.С., Кухарь В.Д. Разрушение полуфабриката при многооперационной вытяжке со структурой и текстурой титанового сплава // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 4. С. 18-23.

55. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Платонов В.И. Разностенность осесимметричных деталей с фланцем при реверсивной вытяжке кристаллических анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 4. С. 26-30.

56. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Ремнев К.С. Математическая модель много-

операционной вытяжки ступенчатых осесимметричных деталей из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 2. С. 409-416.

57. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Ремнев К.С. Многооперационная вытяжка куполообразных тонкостенных деталей ответственного назначения // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 3. С. 144-151.

58. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Ремнев К.С. Технологический процесс изготовления полусферических деталей // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 1. С. 185-191.

59. Технологический процесс изготовления полуторовых днищ / С.С. Яковлев [и др.] // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 2. С. 148-155.

60. Яковлев С.С., Платонов В.И. Математическая модель операции реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из кристаллических анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 1. С. 89-94.

61. Яковлев С.С., Платонов В.И. Силовые режимы операции реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из кристаллических анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 2. С. 537-541.

62. Яковлев С.С., Платонов В.И., Нечепуренко Ю.Г. Предельные возможности операции реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из кристаллических анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 3. С. 463-469.

63. Яковлев С.С., Платонов В.И., Трегубов В.И. Изменений текстуры куполообразных деталей в процессе многооперационной вытяжки // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 4. С. 53-60.

64. Яковлев С.С., Поликарпов Е.Ю. Вытяжка с утонением стенки толстостенных цилиндрических заготовок из анизотропных материалов // Вестник машиностроения. 2009. № 10. С. 63-69.

65. Яковлев С.С., Поликарпов Е.Ю., Подлесный С.В. Оценка предельных возможностей формоизменения многооперационной вытяжки ступенчатых осесимметричных деталей из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. Вып. 2. С. 114 – 119.
66. Яковлев С.С., Ремнев К.С. Многооперационная вытяжка полусферических тонкостенных днищ // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2011. Вып. 3. С. 420-427.
67. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Трегубов В.И. Технологические процессы холодной штамповки полусферических тонкостенных днищ из титанового сплава // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 6. С. 5-12.
68. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Трегубов В.И. Технологические рекомендации по проектированию технологических процессов глубокой вытяжки полусферических днищ // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. Вып. 4. С. 98-102.
69. Яковлев С.С., Трегубов В.И. Теория и технология изготовления крупногабаритных осесимметричных деталей ответственного назначения из высокопрочных анизотропных материалов (монография) / под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 232с.
70. Zharkov V.A. Theory and Practice of Deep Drawing. London: Mechanical Engineering Publications Limited, 1995. 601 p.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Конспект лекций по курсу «Физические основы пластической деформации» в виде новых лекций**



**Министерство образования и науки  
Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Тульский государственный университет»**

**Политехнический институт  
Механико-технологический факультет  
Кафедра «Механика пластического формоизменения»**

*Утверждаю*

Декан механико-технологического  
факультета

\_\_\_\_\_ С.Н. Ларин

30 августа 2012 г.

**Конспект лекций  
по курсу**

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Направление подготовки: 150700 «Машиностроение»

Профиль подготовки: Машины и технология обработки металлов давлением

Форма обучения: очная, заочная, вечерняя

Квалификация выпускника: бакалавр

Направление подготовки: 151000 Технологические машины и оборудование

Профиль подготовки: Теория и технология штамповки  
анизотропных заготовок

Квалификация выпускника: магистр

**Тула 2012 г.**

## СОДЕРЖАНИЕ

### **Лекция № 1. УПРУГАЯ И ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИИ**

- 1.1. Упругая деформация
- 1.2. Пластическая деформация
- 1.3. Механические эффекты и характеристики пластической деформации

### **Лекция № 2. СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ**

- 2.1. Общие понятия о структуре металлических материалов
- 2.2. Кристаллическое строение металлов
- 2.3. Дефекты кристаллического строения
- 2.4. Точечные дефекты

### **Лекция № 3. ХОЛОДНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ**

- 3.1. Картина пластической деформации монокристалла
- 3.2. Физическая природа пластического течения монокристалла
- 3.3. Холодная пластическая деформация поликристаллов
- 3.4. Упрочнение при холодной пластической деформации металлов
- 3.5. Влияние холодной пластической деформации на свойства металлов

### **Лекция № 4. ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ**

- 4.1. Возврат и рекристаллизация
- 4.2. Горячая обработка металлов давлением

### **Лекция № 5. ВИДЫ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

- 5.1. Способы нагружения
- 5.2. Скорость деформации

**Лекция № 6. ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫЕ УСЛОВИЯ  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

- 6.1. Кратковременный нагрев
- 6.2. Кривые ползучести
- 6.3. Механизмы ползучести
- 6.4. Сверхпластичность

**Задания для самоконтроля**

## Лекция № 1. Упругая и пластическая деформации

### План

- 1.1. Упругая деформация.
- 1.2. Пластическая деформация.
- 1.3. Механические эффекты и характеристики пластической деформации

Основным объектом при обработке металлов давлением являются металлические твердые тела. Металлы и сплавы на их основе широко используются для изготовления всевозможных изделий – массивных конструкций и сооружений, крупных или же миниатюрных деталей и узлов машин и механизмов. Эти материалы способны устойчиво сохранять свою форму и размеры, а также противодействовать внешним условиям, стремящимся вызвать их изменения. Однако такими же признаками формально могут обладать «замороженные» жидкости с высокой вязкостью, получаемые в результате охлаждения до низких температур (стекло, эбонит, смола), или аморфные металлические твердые тела. Поэтому по упругим свойствам твердым следует считать такое состояние вещества, для которого модуль сдвига отличен от нуля (у жидкости он имеет нулевое значение). Твердое состояние характеризуется тем, что возникновение необратимой (пластической) деформации требует достижения некоторого порогового (критического) напряжения; в случае аморфного или же «замороженного» жидкого состояния критическое напряжение необратимой деформации равно нулю.

### 1.1. Упругая деформация

Упругая деформация является начальной стадией любого процесса деформирования, во многом определяющей ход последующего пластического течения материала. Характеристиками материалов в упругой области нагружения являются упругие константы (для монокристаллов) и модули упругости – коэффициенты пропорциональности между напряжением и деформацией в законе Гука для соответствующего напряженного состояния. Они отражают сопротивление металла упругому деформированию.

Природа истинных значений модуля упругости определяется силами межатомного взаимодействия атомов в кристаллической решетке, поэтому модуль упругости оказывается температурно-зависимой характеристикой. При чисто упругой деформации в поле внешних напряжений атомы незначительно смещаются от своего равновесного положения и после снятия нагрузки возвращаются в исходное состояние.

Коэффициентами пропорциональности, связывающими напряжение и деформации, являются:  $E$  – модуль Юнга при одноосном растяжении;  $G$  – модуль сдвига;  $\bar{K}$  – объемный модуль упругости.

Характеристики упругости (константы материала) связаны между собой соотношениями Ляме ( $\nu$  – коэффициент Пуассона):

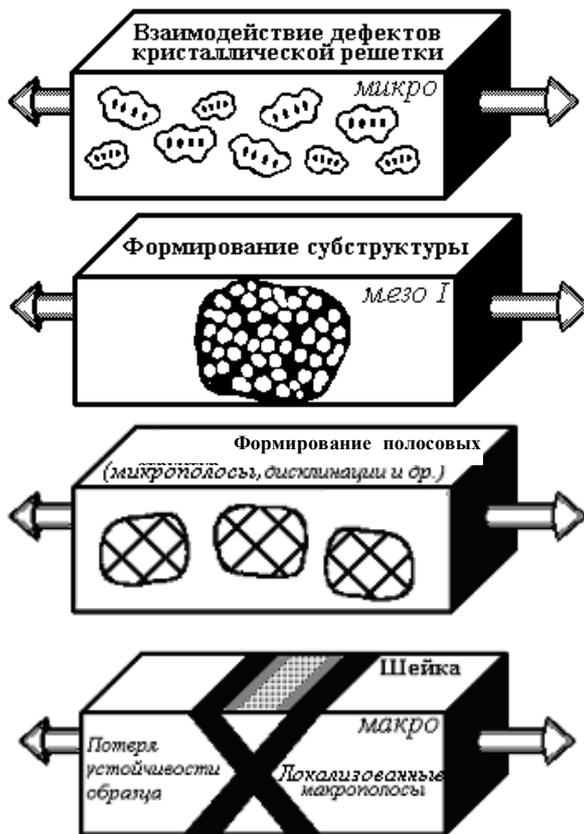
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}; \quad \bar{K} = \frac{E}{3(1-2\nu)}. \quad (1.1)$$

## 1.2. Пластическая деформация

Пластической деформацией называют необратимую деформацию материала, которая сохраняется после снятия нагрузки. Остаточная деформация может проявляться на микроуровне за счет движения дислокаций, на мезоуровне – за счет перестройки и разворота фрагментов дислокационной структуры и на макроуровне в виде остаточного формоизменения.

В основу физической механики деформируемого твердого тела положена концепция структурных уровней деформации твердых тел. Ее суть составляют следующие положения:

1. Деформируемое твердое тело есть многоуровневая система, в которой пластическое течение самосогласованно развивается как последовательная эволюция потери сдвиговой устойчивости на различных масштабных уровнях: микро, мезо и макро (рис. 1.1).



**Рис. 1.1.** Схема масштабных уровней потери сдвиговой устойчивости в деформируемом твердом теле:  
а – микро; б – мезо I; в – мезо II;  
г – макро (В.Е. Панин)

2. Носителями пластического течения на мезоуровне являются трехмерные структурные элементы (субзерна, ячейки дислокационной суб-структуры, частицы второй фазы, поры и др.), движение которых характеризуется схемой «сдвиг+поворот». Закономерности пластического течения связаны с фрагментацией деформируемого материала.

3. Разрушение есть завершающая стадия фрагментации твердого тела, когда она локализуется на макромасштабном уровне.

4. Механизмы пластического течения и соответствующие стадии кривой «напряжение – деформация» подчиняются закону подобия (принцип масштабной инвариантности)

### 1.3. Механические эффекты и характеристики пластической деформации

Условные и истинные диаграммы деформации при растяжении, сжатии, изгибе и кручении являются основными источниками получения сведений о прочностных и пластических свойствах металлических материалов (рис. 1.2).

На условных диаграммах деформации нагрузку  $P$  относят к начальной площади поперечного сечения образца  $F_0$ , а соответствующие условные напряжения определяют как  $\sigma = P/F_0$ . К основным характеристикам прочности относят предел пропорциональности  $\sigma_{п.ц}$ , предел упругости  $\sigma_y$ , условный  $\sigma_{0,2}$  или истинный  $\sigma_T$ , предел текучести и временное сопротивление разрыву (или условный предел прочности)  $\sigma_g$ . При кручении эти характеристики выражаются не через нормальные, а через касательные напряжения  $\tau_{max} = M_{кр}/W$  ( $M_{кр}$  – крутящий момент,  $W$  – момент сопротивления).



**Рис. 1.2.** Общий вид условной  $\sigma - \varepsilon$  и истинной  $S - \varepsilon$  диаграмм деформации для низкоуглеродистой стали

Для описания деформированного состояния используются такие понятия, как относительная линейная деформация  $\varepsilon$ , сдвиговая деформация  $\gamma$ , относительное изменение объема  $\Delta V/V_0$ , относительные поперечные деформации  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$ . Коэффициент Пуассона  $\nu = -(\varepsilon'/\varepsilon)$  определяет отношение поперечной деформации к продольной, взятое с обратным знаком (для металлов  $\nu \cong 0,3$ ). Сдвиговая деформация  $\gamma$  связана с относительным изменением углов элементарных объемов тела (куба) между направлениями, которые были параллельными до деформации. Относительный сдвиг равен тангенсу угла сдвига или самому углу  $\gamma$  при малых деформациях, измеренному в радианах. При простом сдвиге расстояние между перемещающимися плоскостями остается постоянным, т.е. отсутствует сжатие или удлинение куба, при чистом сдвиге может возникнуть симметричное смещение граней, соответственно сдвиговая деформация составляет  $1/2 \gamma$ .

При описании процессов формоизменения элементарных объемов используются также понятия поверхностной и объемной деформации, характеризующие изменения площади (участка поверхности) или всего объема. Упругая деформация вызывает обратимое изменение объема: при всестороннем сжатии давлением 1000 МПа стали – 0,6 %, меди – 1,3 %.

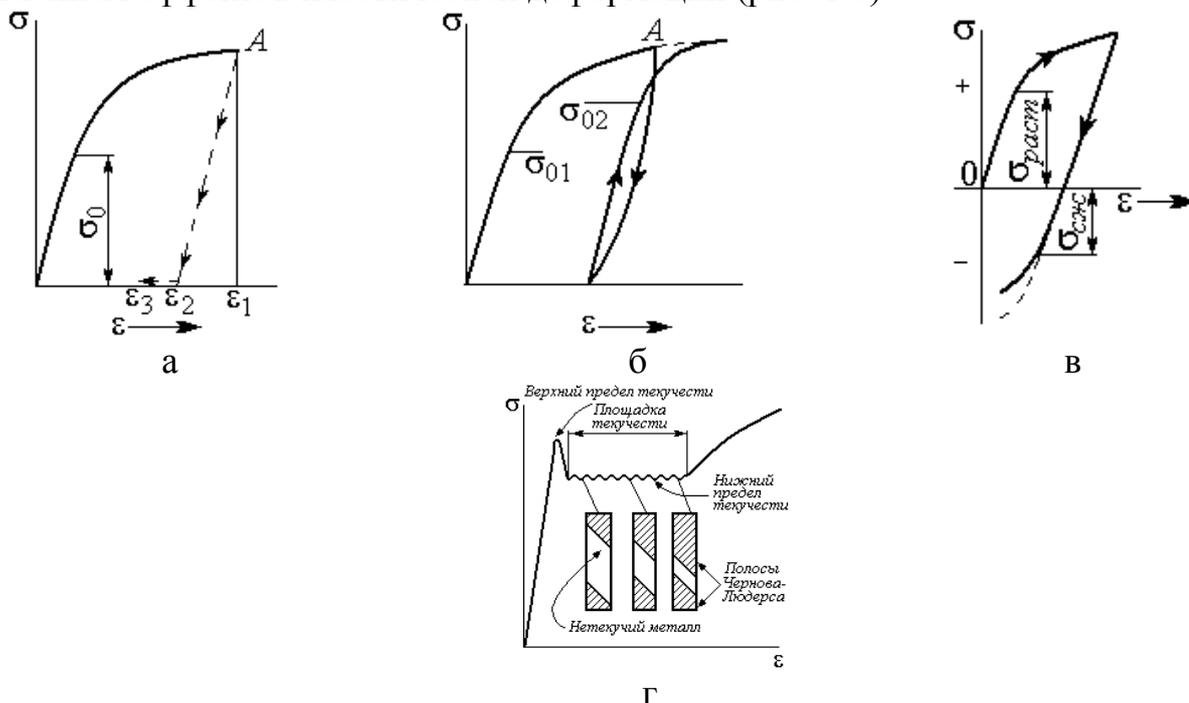
За пределами упругой области при нагружении понятие модуля упругости теряет смысл и используется понятие коэффициента упрочнения  $d\sigma/de$  для каждой стадии нагружения. Относительные деформации  $\varepsilon(\gamma)$  и относительные напряжения  $\sigma(\tau)$  характеризуют процесс нагружения на стадии равномерного удлинения образца. Начиная с некоторого момента деформация локализуется на узком участке длины образца (утонение, шейка), вызывая значительную неоднородность деформации по длине образца. Поэтому при определении истинной деформации  $e$  учитывается не начальная длина образца, а переменная – увеличивающаяся в процессе деформации:

$$e = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_k}{l_0}. \quad (1.2)$$

В отличие от условной только истинная деформация отражает физическую природу процесса деформирования и прежде всего при значительных степенях деформации ( $> 10\%$ ). Принцип аддитивности деформаций (суммарная деформация равна сумме деформаций на промежуточных этапах деформирования) выполняется только для истинных деформаций. Широкое использование  $\sigma_e$  в качестве характеристики прочности обусловлено в большей мере простотой ее определения при механических испытаниях, а не ее информационной ценностью как критерия разрушения материала.

Истинное напряжение  $S = P/F_k$  – это нагрузка, отнесенная к поперечному сечению образца в заданный момент нагружения. За точкой  $b$  истинное сопротивление деформации  $S$  продолжает расти, а диаграмма истинных напряжений  $S - e$  отражает напряжение истинного сопротивления разрыву  $S = P_k/F_k$  – отношение силы в момент разрушения к минимальной площади поперечного сечения в месте разрыва.

Ряд особенностей диаграммы деформации при статическом нагружении связан с проявлением эффектов пластической деформации (рис. 1.3).



**Рис. 1.3.** Петля механического гистерезиса (а), эффекты наклепа (б), Баушингера (в) и зуб текучести при нагружении (г) (на примере технически чистого железа)

Петля механического гистерезиса означает, что деформация не является однозначной функцией напряжения, а кривые нагружения и снятия нагрузки не совпадают (рис. 1.3, а), что есть следствие невыполнения линейного закона Гука, так как модуль упругости в течение цикла  $d\sigma/d\varepsilon$  зависит от деформации. Здесь  $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$  – обратимая упругая деформация,  $(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)$  – неупругая деформация, восстанавливаемая во времени.

Эффект наклепа (упрочнения) проявляется после снятия нагрузки, при вторичном нагружении в пределах одной схемы напряженного состояния напряжение сопротивления текучести возрастает (рис. 1.3, б –  $\sigma_{02} > \sigma_{01}$ ) и тем больше, чем выше напряжение предварительного деформирования.

Эффект Баушингера (1886 г.) связан с переменной схемы нагружения – падение напряжения течения при смене растяжения  $\sigma_{раст}$  сжатием  $\sigma_{сж}$  и наоборот (рис. 1.3, в); за меру эффекта принимают такие характеристики, как  $(\sigma_{раст} - \sigma_{сж})$ ,  $(\sigma_{раст} / \sigma_{сж})$  и др. Это означает, что в холоднодеформированных кристаллах движение дислокаций в обратном направлении при смене знака напряжения облегчено. Наибольший эффект достигается на стадии легкого скольжения ГПУ- и ГЦК-кристаллов (при перемене знака нагружения дислокации могут возвращаться к источникам и аннигилировать).

Зуб текучести с выраженными верхним и нижним пределами текучести и площадкой текучести (рис. 1.3, г) обнаружен на моно- и поликристаллах железа, в твердых растворах внедрения Cd-N, Zn-N,  $\beta$ -латунь-N, в твердых растворах замещения Cu – 30% Zn, Cu – 10% In, в полупроводниковых материалах и др. Деформация на площадке текучести происходит путем распространения пластических волн с образованием полос Чернова – Людерса. Поперечное сечение вблизи полос уменьшается, полосы образуются в нескольких местах и расширяются до тех пор, пока они не встретятся. После того как весь образец покрывается полосами Чернова – Людерса и каждый участок образца продеформирован на заданную величину, начинается обычный процесс деформационного упрочнения. С повышением температуры зуб текучести на диаграммах деформации постепенно исчезает, и кривые в определенном интервале температур приобретают пилообразный профиль (сплавы Fe-C, Al-Mg). Это явление динамической неустойчивости называют эффектом Портевена – Ле Шателье. Оно связано с уменьшением коэффициента упрочнения при уменьшении скорости деформирования или при повышении температуры.

Большинство структурно чувствительных свойств материалов (прочность, пластичность) являются функциями трех факторов: материала (состав, структура, обработка), вида напряженного состояния (форма, размеры, условия закрепления) и условий внешнего воздействия (температура, уровень нагружения, внешняя среда и поля – облучение, магнитное поле и т.п.). Материал в конструкциях должен обеспечить прочность, надежность и необходимый ресурс работы.

Обобщенные диаграммы Эшби дают достаточно полное представление о свойствах широкого круга материалов, включая технические сплавы и композиты [8].

Выбор материала и его характеристик для обеспечения надежной работы реальной инженерной конструкции является сложной конструкторской и технологической задачей. Пути повышения удельной прочности связаны с обоснованным выбором оптимальных соотношений прочностных, упругих характеристик материала и его веса. Диаграммы Эшби позволяют сделать оценку качества материала применительно к реальным условиям работы изделия.

## **Лекция № 2. Строение металлов**

### **План**

- 2.1. Общие понятия о структуре металлических материалов.**
- 2.2. Кристаллическое строение металлов.**
- 2.3. Дефекты кристаллического строения.**
- 2.4. Точечные дефекты.**

### **2.1. Общие понятия о структуре металлических материалов**

Обработке давлением преимущественно подвергаются кристаллические твердые тела – металлы и сплавы на их основе, сохраняющие приданную им форму до определенных температур. Металлическое тело может состоять из одного кристалла (монокристалл) или из множества кристаллов (поликристаллы). В зависимости от масштаба структурных составляющих и применяемых методов их изучения физическое металловедение использует такие понятия, как кристаллическая структура, микро- и макроструктура.

**Кристаллическая структура.** Металлы относятся к природным веществам, способным иметь в твердом состоянии кристаллическое строение. Термин «кристаллическое строение» включает два понятия – совершенной (или идеальной) и несовершенной (или дефектной) структуры. В реальных твердых металлах имеется большое количество дефектов кристаллического строения различного типа, обусловленных отклонениями от правильного расположения атомов. Теория несовершенств кристаллического строения и комплекс структурных и экспериментальных методов исследований дают возможность выявить физическую природу многих практически важных явлений, таких как пластическая деформация и упрочнение, диффузия и плавление, возврат и рекристаллизация, закалка и отпуск и многих других.

**Микроструктура.** В основе микроструктурного анализа лежат методы изучения структурных составляющих. Металлы и их сплавы характеризуются составом (% по массе или атомные), фазовым состоянием и структурой. Металлографический анализ дает возможность определить размеры, форму и ориентировку кристаллов (зерен), их распределение и относительные объемные количества, форму инородных включений и пустот, внутризеренное строение (блоки, ячейки), несовершенства кристаллического строения (линии, полосы и пачки скольжения, двойникование, дислокационные сетки и скопления) и т.д.

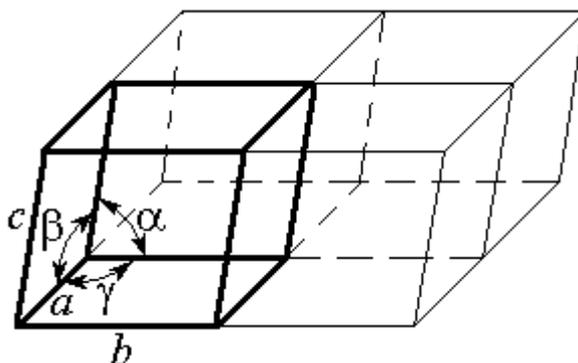
**Макроструктура.** Структурный анализ макроструктуры выполняется с помощью визуального осмотра или при небольших увеличениях с помощью лупы. Этот весьма информативный метод исследования позволяет выявить характер излома, хими-

ческую неоднородность, размеры и форму крупных кристаллов, волокнистость, наличие пор и трещин и другие дефекты.

## 2.2. Кристаллическое строение металлов

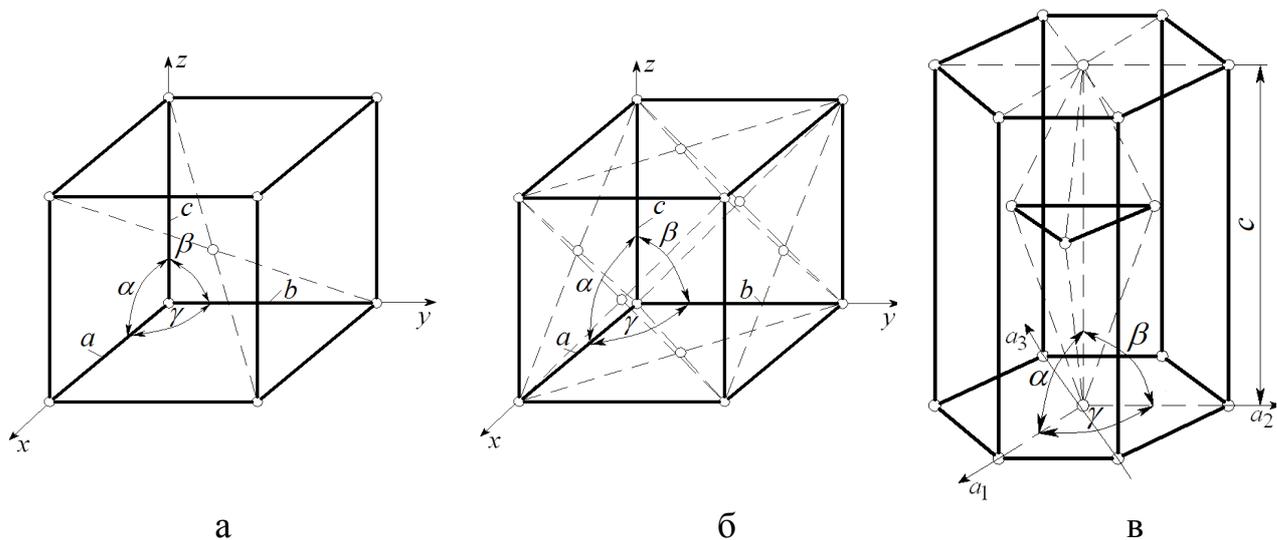
В 1848 г. О. Браве показал, что все многообразие кристаллических структур в зависимости от их симметрии можно описать с помощью 14 типов решеток, характеризующихся различными элементарными ячейками. Ячейки Браве отличаются друг от друга соотношением параметров, углами и месторасположением материальных частиц.

Под параметрами понимаются угловые соотношения между ребрами (или гранями) элементарной ячейки  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и размерное соответствие ребер (или периодов решетки)  $a$ ,  $b$ ,  $c$  (рис. 1.4). Элементарную ячейку ориентируют относительно выбранной системы координат так, чтобы ее ребра совпадали с координатными осями, а длины ребер были соизмеримы с масштабными отрезками. Размер элементарной ячейки кристаллической решетки называют периодом решетки. Любую кристаллическую решетку можно воспроизвести последовательными перемещениями (трансляциями) элементарной кристаллической ячейки. Совокупность координат узлов, принадлежащих элементарной ячейке, называют базисом ячейки.



**Рис. 1.4.** Пространственная решетка и ее элементарная ячейка

Для металлов и сплавов наиболее распространенными являются следующие системы упаковки атомов в кристаллической ячейке: объемноцентрированная кубическая (ОЦК), гранецентрированная кубическая (ГЦК) и гексагональная плотноупакованная (ГП) решетки (рис. 1.5).



**Рис. 1.5.** Элементарные ячейки структур с ОЦК- (а), ГЦК- (б) и ГП- (в) решетками

Наиболее высокой симметрией обладают кристаллы кубической системы (рис. 1.5, а и б). Элементарной ячейкой является куб, его описание дается в обычной декартовой системе координат ( $a = b = c$ ;  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ). Для гексагональных плотноупакованных кристаллических решеток используется четырехмерная индексация решетки (рис. 1.5, в), базирующаяся на координатной системе с четырьмя осями: три базовые координатные оси  $a_1, a_2, a_3$ , расположенные под углом  $120^\circ$  относительно друг друга, и четвертая, вертикальная ось  $c$ , расположенная в центре ячейки.

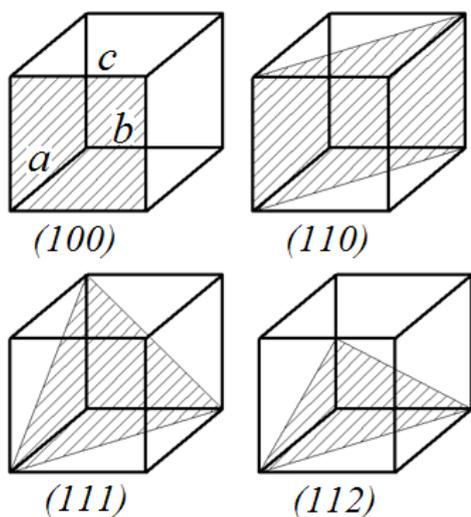
Кристаллографические индексы плоскостей и направлений. Начало прямоугольных координат в кубической кристаллической ячейке выбирают в вершине ячейки, располагая ось  $y$  вправо, ось  $z$  – вверх (рис. 1.5, а и б). Обратные направления противоположны описанным. Координаты узлов (атомных позиций) выражают с использованием единичных долей трансляции (расстояний) вдоль осей  $x, y$  и  $z$  и обозначают в двойных квадратных скобках. Например, координаты атомов в восьми угловых позициях объемноцентрированной кубической решетки составляют:

$[[0, 0, 0]]$	$[[1, 0, 0]]$	$[[0, 1, 0]]$	$[[0, 0, 1]]$
$[[1, 1, 1]]$	$[[1, 1, 0]]$	$[[1, 0, 1]]$	$[[0, 1, 1]]$

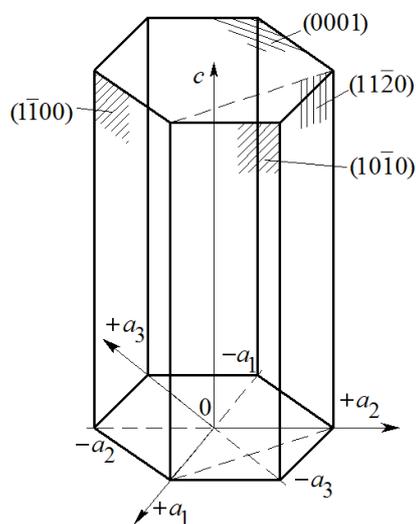
Индексы могут быть дробными. Например, положение центрального атома в ОЦК-решетке отвечает координатам  $[[\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}]]$ . Аналогично могут быть заданы другие атомные позиции.

Для аналитической записи взаимного расположения плоскостей и направлений кристалла в пространстве применяют кристаллографические символы (индексы Миллера). Под индексами плоскости понимают три целых взаимно простых числа

$h, k, l$ , обратно пропорциональных отрезкам, отсекаемым этой плоскостью на координатных осях. Отрезки измеряются в параметрах или их долях и являются числами безразмерными. Символ плоскости изображается в круглых скобках  $(hkl)$ . Если плоскость параллельна какой-либо координатной оси, то соответствующий индекс равен нулю. Порядок нахождения индексов Миллера в кубической решетке следующий. Находят отрезки, отсекаемые плоскостью на координатных осях в параметрах решетки  $a, b, c$ , например, пусть отрезки составляют  $1/4, 1/2, 3/4$ . Берут величины, обратные отрезкам, и определяют их отношения:  $4 : 2 : 4/3$ . Полученные отношения приводят к отношению трех целых взаимно простых чисел:  $12 : 6 : 4 = 6 : 3 : 2$ . Индекс плоскости будет  $(632)$ . На рис. 1.6 приведены характерные для кубических решеток плоскости. Для нахождения индексов Миллера любой кристаллографической плоскости или грани в ГП-решетке используют четырехосную систему координат (см. рис. 1.5, в). Символ плоскости запишется как  $(hkil)$ . Положение базисной плоскости вверху ГП-решетки параллельно осям  $a_1, a_2$  и  $a_3$ , а отрезки этой плоскости могут быть бесконечно большими:  $a_1 = \infty, a_2 = \infty$  и  $a_3 = \infty$ . Ось  $c$  является общей, так как базисная плоскость пересекает ее. Обратные значения указанных отрезков являются согласно правилу Миллера – Браве индексами для ГП базисной плоскости  $h = 0, k = 0, i = 0$  и  $l = 1$ , и она обозначается как  $(0001)$ . На рис. 1.7 показаны некоторые плоскости в гексагональной ячейке.



**Рис. 1.6.** Обозначения некоторых плоскостей кубических ячеек



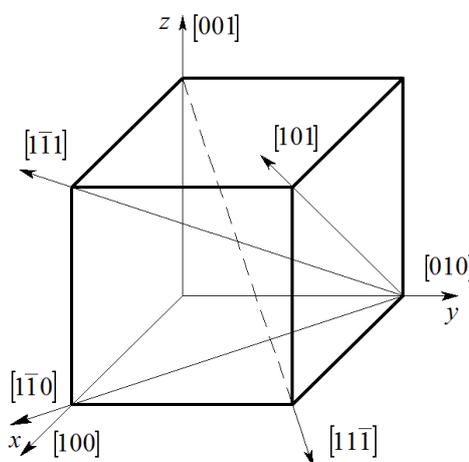
**Рис. 1.7.** Некоторые плоскости в гексагональной ячейке

Кристаллографические индексы направления в кубической решетке определяются координатами вектора, выходящего из начала координат. Например, точка  $u, v, w$  связана с точкой  $0,0,0$  векторной трансляцией  $r = ua + vb + wc$ , где  $a, b$  и  $c$  – постоянные решетки;  $u, v, w$  – коэффициенты при векторах по осям  $x, y, z$  соответственно. Кристаллографические индексы координат вектора разделяются по направлениям каждой из координатных осей и приводятся к минимальным значениям.

Индексы в квадратных скобках  $[uvw]$  должны быть числами целыми и взаимно простыми, отрицательные значения индексов обозначают знаком «минус» над индексом. Таким образом, индексы направления  $u, v, w$  – это три целых взаимно простых числа, пропорциональных координатам ближайшего узла на данном направлении.

Например, координаты узла:  $[\frac{1}{2} \ 1 \ \frac{1}{2}]$ . Тогда  $u : v : w = \frac{1}{2} : 1 : \frac{1}{2} = 1 : 2 : 1$ . Следовательно, искомое направление –  $[121]$ . Координаты узла  $(1, \frac{1}{2}, 0)$  отражаются преобразованными (умноженными на 2) индексами  $[210]$ , для координат узла  $(-1, -1, 0)$  – индексы направления  $[\bar{1} \ \bar{1} \ 0]$ .

На рис. 1.8 показаны основные направления в кубической элементарной ячейке и их обозначение.



**Рис. 1.8.** Схематическое изображение основных направлений в кубической элементарной ячейке

**Анизотропия кристаллов.** Под анизотропией понимается зависимость механических и физических свойств кристалла от выбранного в нем направления. В основном все кристаллы анизотропны, и их упругие постоянные (или скорость распространения звука) зависят от ориентировки. Это хорошо иллюстрирует изменение констант (постоянных) упругости в монокристаллах, учитывающих индекс направления, вдоль которого проводятся измерения.

**Поликристаллы** состоят из множества жесткосвязанных между собой отдельных кристаллитов (зерен), имеющих различную ориентировку, поэтому они являются квазиизотропными. Однако если в пространственном расположении таких кристаллических зерен наблюдается упорядоченность, то поликристаллический материал окажется также анизотропным. Подобная преимущественная кристаллографическая ориентировка зерен называется текстурой. Она может возникать, например, в результате ряда технологических обработок металлов давлением – при волочении, прокатке.

**Полиморфизм.** Свойство кристаллов в твердом состоянии при разных температурах (или давлении) иметь различный тип упаковки кристаллической решетки (аллотропические формы или модификации кристаллической структуры) называют полиморфизмом. Низкотемпературную модификацию обозначают  $\alpha$ , высокотемпера-

турные –  $\beta, \gamma, \delta$  и т.д. Стабильность модификаций определяется при заданных внешних параметрах (температура, давление). Полиморфизм оказывает существенное влияние на пластичность при горячей обработке металлов и сплавов и в режиме сверхпластичности. В табл. 1.1 приведены температурные области существования кристаллических модификаций некоторых полиморфных металлов.

Таблица 1.1

Температурные области кристаллических модификаций

Металл	Кристаллическая упаковка	Температурная область существования данной модификации, °С
Титан	ГП	до 882
	ОЦК	882...1668
Железо	ОЦК	до 911
	ГЦК	911...1392
	ОЦК	1392...1539
Кобальт	ГП	до 477
	ГЦК	477...1490

### 2.3. Дефекты кристаллического строения

Пространственная решетка металлических кристаллов – это идеализированная модель расположения атомов в объеме. Чтобы разрушить такой кристалл, необходимо разорвать межатомные связи. Впервые теоретическую оценку критического скалывающего напряжения сделал Я.И. Френкель для модели идеально «жесткого» сдвига. Было показано, что максимальное (амплитудное) значение  $\tau_{теор} \approx G/2\pi$  ( $G$  – модуль сдвига). Сравнение теоретических оценок с экспериментальными данными обнаружало их существенное расхождение на три – четыре порядка (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Значения критических скалывающих напряжений в кристаллах при комнатной температуре

Материал	$\tau_{теор}$ , ГПа	$(\tau_{кр})_{экспер}$ , ГПа	Чистота, %
Медь	7,68...8,34	$3 \cdot 10^{-3}$	99,93
Серебро	4,8...5,34	$(4...7) \cdot 10^{-4}$	99,999
Золото	4,85	$5 \cdot 10^{-4}$	99,999
Магний	3,13	$5 \cdot 10^{-4}$	99,99
Цинк	5,01...7,35	$9,5 \cdot 10^{-4}$	99,96
Железо	13	$2 \cdot 10^{-2}$	99,94
Хлорид натрия (по-	2,4...2,7	$10^{-3}$	99,9

Ответ на вопрос о несоответствии реальной и теоретической прочности кристаллов был получен в 30-х годах XX столетия. Наш соотечественник Я.И. Френкель, зарубежные физики Дж. Тейлор, Е. Орован, М. Поляни предположили, что кристалл не разрушается сразу по плоскости сдвига. Процесс деформации постепенно распространяется в кристалле. В каждый момент времени только у небольшого количества атомов происходит разрыв связей. Затем такой локальный сдвиг подобно волновому процессу передается эстафетно от атома к атому через весь кристалл. Были разработаны основы теории дефектов кристаллической решетки (теория дислокаций).

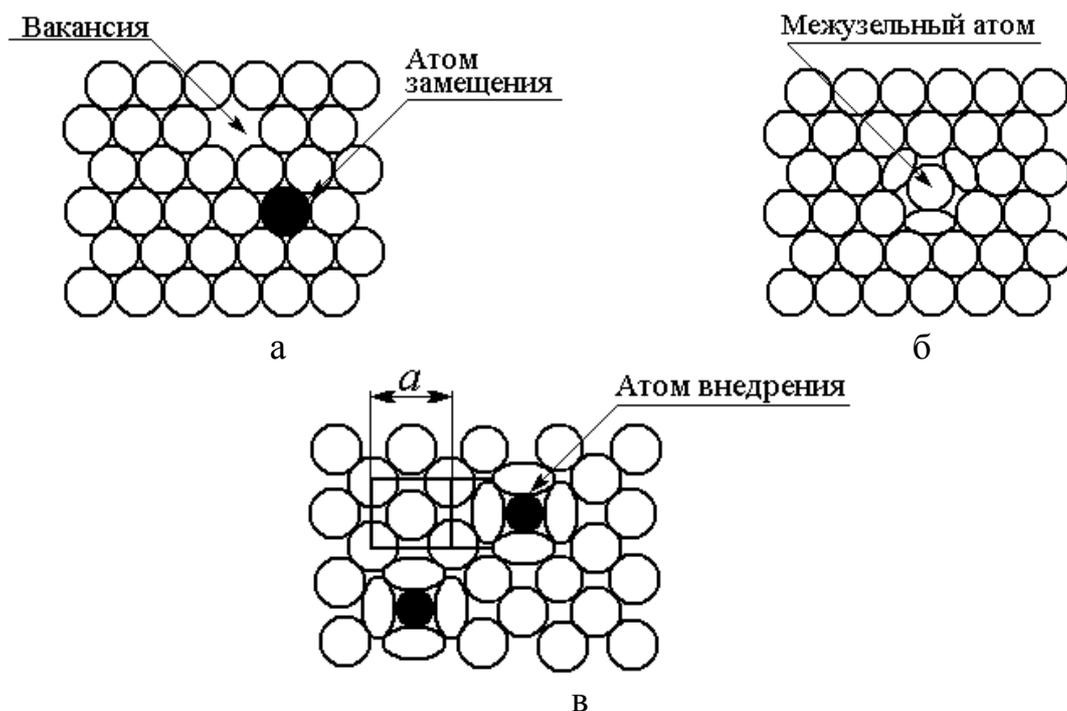
Решетка реального кристалла имеет различного рода дефекты, или несовершенства, обусловленные нарушением его периодической структуры. По геометрическому признаку их делят на точечные, линейные, поверхностные и объемные. Точечные, линейные и поверхностные дефекты считаются микроскопическими, так как, по крайней мере, в одном направлении их протяженность измеряется лишь несколькими атомными диаметрами. Объемные несовершенства относят к макроскопическим, имеющим во всех трех измерениях сравнительно большие размеры (поры, трещины, царапины). Несовершенствами кристаллического строения являются дефекты микроскопических размеров. От наличия и поведения дефектов зависят структурно-чувствительные свойства кристаллических материалов, механизмы диффузии и массопереноса вещества, химические реакции в твердом состоянии. Пластические свойства и формоизменение металлов и сплавов, их эксплуатационная стойкость, усталость, ползучесть и разрушение определяются подвижностью и взаимодействием дефектов.

#### 2.4. Точечные дефекты.

Размеры точечных дефектов по всем направлениям не превышают нескольких атомных диаметров. К таким дефектам относят структурные точечные дефекты – вакансии, меж-узельные атомы, а также примесные атомы внедрения и замещения (рис. 1.9).

Вакансии представляют собой узлы решетки, в которых отсутствуют атомы. Межузельные атомы являются как бы избыточными, лишними атомами и располагаются в междоузлиях. Появление точечных дефектов вызывает упругие искажения в кристаллической решетке, на расстоянии одного-двух атомных диаметров от центра дефекта создаются заметные смещения соседних атомов из равновесных положений. Наибольшие искажения решетки вносятся межузельными атомами, поэтому энергетические затраты на их образование (энергия активации) в 3-4 раза выше, чем для вакансий.

Примесные атомы внедрения располагаются преимущественно в микропорах, где для них имеется достаточно свободного пространства, образуя тем самым твердый раствор внедрения (рис. 1.9, в). Примесные атомы в узлах кристаллической решетки, занимая места атомов основного компонента, образуют твердый раствор замещения (рис. 1.9, а). Роль точечных дефектов в этом случае выполняют примесные атомы, размер которых отличается от размера атомов, образующих решетку.



**Рис. 1.9.** Типы точечных дефектов кристаллической решетки: вакансия (а); межузельный атом (б); примесные атомы замещения (а) и внедрения (в)

При значительной деформации кристалла, например, при воздействии ковкой, прокаткой или волочением, возникают многочисленные дефекты структуры, в том числе и точечные, хотя решетка при этом по-прежнему сохраняет в основном свою кристаллическую упаковку. Избыточное (для данной температуры) количество точечных дефектов может быть достигнуто при резком охлаждении от более высокой температуры (закалке) или в результате радиационного облучения металлов частицами с высокой энергией. Избыток вакансий сверх равновесной концентрации с течением времени исчезает на свободных поверхностях кристалла, порах, границах зерен и других дефектах. Места, где исчезают вакансии, называются стоками. Вакансии ускоряют все процессы, связанные с перемещением атомов, – диффузию, ползучесть, спекание порошков, плавление и многие другие.

**Линейные дефекты (дислокации).** Дислокации в том ли ином количестве всегда присутствуют в кристаллах. В 50-е годы прошлого столетия с развитием трансмиссионной электронной микроскопии удалось экспериментально наблюдать наличие дислокаций в кристаллических структурах.

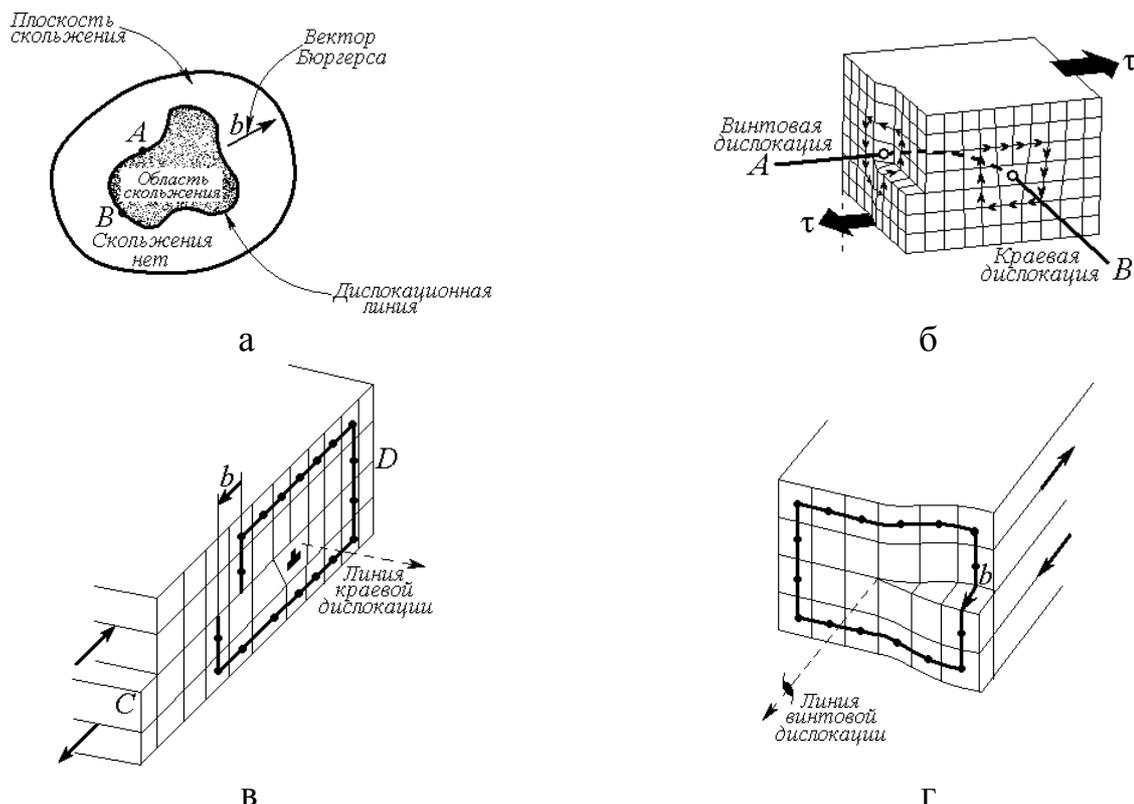
Они возникают из-за напряжений роста, обусловленных температурным градиентом на границе фронта кристаллизации, за счет конденсации вакансий, наличия включений и пр. Пластическая деформация является результатом непрерывного генерирования и движения таких дислокаций.

Дислокации представляют собой одномерный дефект, проявляющийся при сдвиге в кристалле. На рис. 1.10, а изображена схема дислокационной петли, лежа-

щей в плоскости скольжения, на которой выделены области пластической деформации (скольжения) и области, где скольжения не было. Граница между участком, в котором скольжение уже прошло, и остальной частью кристалла, в которой скольжения еще не было, называется линией дислокации. С ней связано нарушение расположения атомов в плоскостях выше и ниже плоскости скольжения (рис. 1.10, б). Такое геометрическое несоответствие вдоль дислокационной линии ( $AB$  на рис. 1.10, б) компенсируют смешанные дислокации, имеющие различную долю краевой и винтовой компонент. Дислокационная линия будет чисто краевой в точке  $B$  и чисто винтовой в точке  $A$ . В любой произвольной точке линии смешанной дислокации можно разделить на краевую и винтовую составляющие.

**Краевая дислокация.** На рис. 1.10, в для случая простой кубической решетки показан разрез по атомной плоскости, перпендикулярной к дислокационной линии. В верхней части кристалла выше плоскости скольжения  $CD$  находится неполная атомная плоскость, вставленная в кристалл и не имеющая продолжения в его нижней половине (экстраплоскость). Вдоль края экстраплоскости тянется область несовершенной решетки. Непосредственно вблизи края экстраплоскости решетка сильно искажена, выше края решетка оказывается сжатой, а ниже – растянутой.

Область несовершенного кристалла вокруг края экстраплоскости называется краевой дислокацией. Лишняя полуплоскость может находиться выше и ниже плоскости скольжения, в первом случае дислокацию условно принято называть положительной, а во втором – отрицательной. Обе дислокации обозначаются специальными значками – соответственно  $\perp$  и  $\top$ . Сдвиг кристалла происходит перпендикулярно к линии краевой дислокации. Положительные и отрицательные дислокации движутся по плоскости скольжения в противоположных направлениях, создавая сдвиг одного и того же знака.



**Рис. 1.10.** Дислокации: а – в плоскости скольжения; б – в перпендикулярной

плоскости;  $v$  – краевая (линейная) дислокация;  $g$  – винтовая дислокация

**Винтовая дислокация.** Винтовая дислокация образуется при сдвиге верхней части надрезанного по плоскости скольжения кристалла на одно межатомное расстояние (рис. 1.10, г). Граница зоны сдвига является линией винтовой дислокации, параллельной вектору сдвига (смещения). Образовавшаяся при таком сдвиге ступенька на передней грани не проходит через весь кристалл. Вертикальные атомные плоскости несколько изогнутся, и край каждой из них сомкнется с краем ближайшей соседней плоскости. В результате образуется единая атомная плоскость, закрученная по винту (лишней атомной плоскости в этом случае нет). После сдвига на параметр решетки атомные плоскости образуют винтовую поверхность, осью которой является линия дислокации. Область несовершенства простирается вдоль линии винтовой дислокации, в то время как вдали от линии дислокации решетка остается практически без искажений. Винтовая дислокация, как и резьба винта, может быть правой (положительная) и левой (отрицательная).

Вектор Бюргерса  $\bar{b}$  является вектором неувязки между замкнутым контуром, построенным вокруг линии дислокации (см. рис. 1.10, б – случай В), и контуром, построенным в решетке совершенного кристалла (см. рис. 1.10, в). Если полностью воспроизвести в области краевой дислокации построение контура для совершенного кристалла от старта до финиша, то он окажется незамкнутым. Таким образом, вектор Бюргерса отражает величину и направление сдвига, вызванного движением дислокации, определяет энергию дислокации, является показателем упругих искажений решетки, создаваемых этим дефектом, и мерой ее подвижности. Принятая в теории дислокаций форма записи вектора Бюргерса позволяет отразить его величину и направление. У краевой дислокации вектор Бюргерса перпендикулярен к дислокационной линии, у винтовой дислокации ее линия по направлению совпадает с ним.

Трехмерная дислокационная сетка образуется при равновесном распределении дислокаций в недеформированном кристалле. Дислокации встречаются в узлах, в которых удовлетворяются условия равновесия сил линейного натяжения. При этом результирующий вектор Бюргерса, являющийся суммой векторов Бюргерса, сходящихся в узле дислокаций, должен быть равен нулю. Когда все три дислокации имеют одинаковую энергию, то в ГЦК-решетках они встречаются в узле под углом  $120^\circ$ . Сетки могут быть не только трехмерными, но и плоскими.

Плотность дислокаций  $\rho$  – суммарная длина всех дислокаций в единице объема кристалла (или количество дислокаций, пересекающих единицу площади поверхности кристалла) – одна из важнейших структурных характеристик. Плотность дислокаций зависит от состояния материала и вида его обработки. В металлах и сплавах происходит значительный рост  $\rho$  при деформации, фазовом наклепе, лазерной обработке.

**Поверхностные дефекты.** Твердые тела имеют не только внешние поверхности, но и внутренние границы, которые способны влиять на свойства металлических материалов, – дефекты упаковки, мало- и высокоугловые границы зерен, границы двойников и другие.

**Дефект упаковки.** Когда в зоне сдвига дислокации полная дислокация приобре-

тает иное расположение атомов, отличное от первоначального, ее называют частичной. Это возможно в решетках с плотной упаковкой атомов, например, ГЦК, ОЦК и ГПУ, т.е. в большинстве реальных металлов. При перемещении частичной дислокации решетка не совмещается сама с собой, и в плоскости скольжения нарушается сопряжение атомов плоскостей, лежащих выше и ниже ее, т.е. нарушается порядок укладки атомных слоев. Это приводит к появлению добавочной энергии, обусловленной образованием поверхности.

Локальное нарушение чередования атомных слоев называют дефектом упаковки.

Границы зерен. В поликристаллических материалах существуют внутренние границы (поверхности), разделяющие соседние зерна. Они представляют собой области несовершенного контакта, где имеется нарушение непрерывности кристаллической структуры. Два соседних зерна в общем случае имеют несовпадающую кристаллографическую ориентировку. В зависимости от угла разориентировки  $\theta$  принято выделять высоко- и малоугловые границы. К малоугловым относят границы с углом разориентировки не более  $5^\circ$ . Если этот угол превышает  $10^\circ$ , то такие границы считаются высокоугловыми (при  $\theta \sim 5..10^\circ$  границы относятся к среднеугловым).

При переходе через высокоугловые границы происходит резкий скачок ориентировки атомных плоскостей и анизотропных свойств соприкасающихся решеток соседних кристаллов. Это объясняет многие свойства границ зерен – высокую подвижность атомов и более быструю диффузию по границам зерен, повышенную травимость границ зерен, упрочняющий и разупрочняющий эффекты при низких и высоких температурах.

Границы внутри одного зерна, состоящие из дислокационных стенок, называют субграницами, а фрагменты, которые они разделяют, – субзернами. Субграница как поверхность с постоянным разворотом представляет собой особый дефект кристаллической решетки. Дисклинация – линейный дефект решетки, охватывающий замкнутый контур Бюргерса, при обходе которого накапливается на угол разворота  $\vec{\omega}$  ( $\vec{\omega}$  – безразмерный вектор ротации Франка); периметр субграницы отражает собой дисклинацию. Субзеренная структура формируется в результате пластической деформации, особенно в металлах с высокой энергией дефектов упаковки. После пластической деформации накапливается избыточное количество дислокаций одного знака, что при последующем нагреве (например, при полигонизации) приводит к образованию малоугловых границ. Из-за невысокой устойчивости субграниц, состоящих из смешанных дислокаций, в решетке преобладают «чистые» границы наклона или кручения. Чем больше плотность дислокаций в стенке и меньше расстояние между ними, тем выше угол разориентировки соседних зерен, малоугловая граница постепенно трансформируется в высокоугловую.

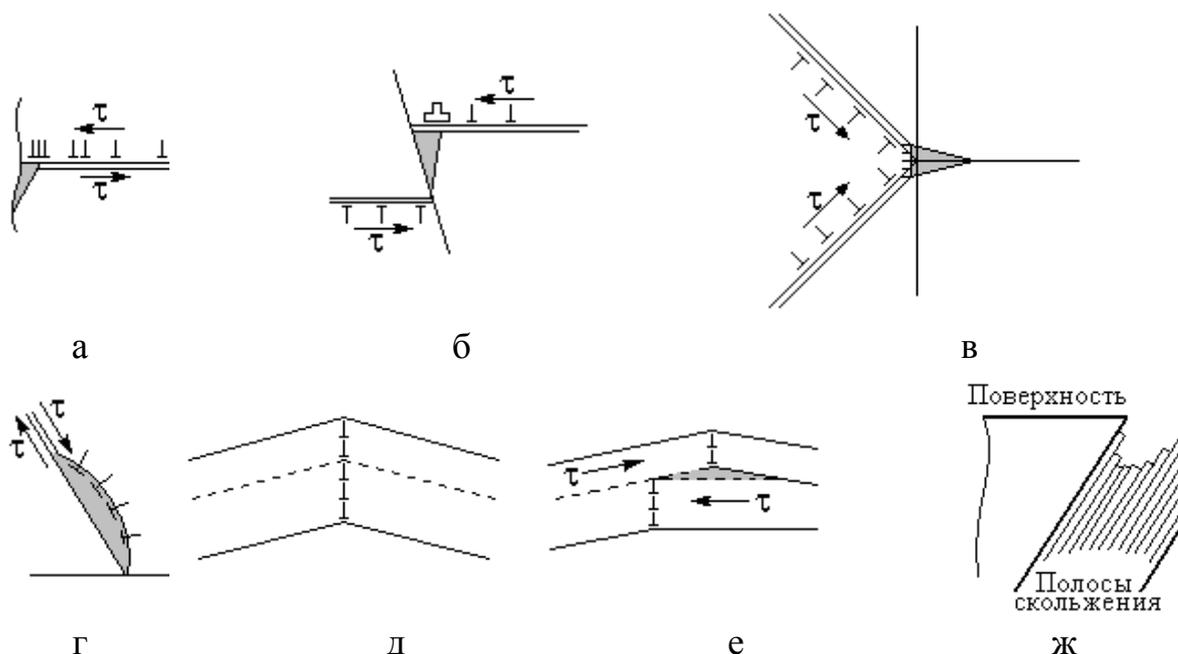
**Объемные дефекты.** Нарушением сплошности называется дефект (полость) в кристалле, наименьший размер которого превышает радиус действия межатомных сил сцепления, а противоположные берега полости можно рассматривать в качестве свободных поверхностей. Различают силовые и геометрические нарушения сплошности – трещины и поры. Особенность трещин состоит в том, что они обладают собственным полем напряжений. В то же время вокруг поры кристалл свободен от на-

пряжений.

Образование трещин. Предложены и нашли экспериментальное подтверждение различные схемы дислокационного зарождения трещин. Простейший пример – слияние нескольких краевых дислокаций в одну (сверхдислокацию) с общим вектором Бюргерса

$$\bar{b}^* = n\bar{b}, \quad \text{где}$$

$n$  – количество слившихся единичных дислокаций, образует ядро в виде зародыша клиновидной трещины. Для зарождения трещин необходима высокая локальная концентрация напряжений. Поэтому обычно трещины возникают у вершин скоплений дислокаций вблизи барьеров. На рис. 1.11 приведены схемы зарождения трещин у дислокационных скоплений – в плоскости (а), параллельных плоскостях (б), пересекающихся плоскостях (в), при искривлении плоскостей скольжения (г), в результате разрыва малоугловой границы (д), если в нижней части кристалла происходит разрыв дислокационной стенки (е), при циклическом нагружении (ж) [8].



**Рис. 1.11.** Схемы зарождения трещин у дислокационных скоплений

Образование пор. Распространенный механизм образования пор – формирование локальных скоплений вакансий с их последующей конденсацией в поры. В объеме вакансионной поры сосредотачиваются за счет диффузии атомы или молекулы растворенного в металле газа. Обработки, связанные с внешним воздействием и приводящие к получению вакансионного пересыщения кристаллической решетки, создают благоприятные условия для порообразования. Специфические особенности эксплуатации металлических материалов могут также привести к возникновению в их объеме газовых пор (пузырьков) с давлением газа, существенно превышающим атмосферное. В таких случаях поры становятся источниками значительных напряжений, что не наблюдается для вакансионных пор.

Возможно образование пор в результате сдвиговых процессов за счет дислока-

ционных перемещений в пересекающихся плоскостях скольжения, например, в случае поперечной прокатки, когда по мере поворота заготовки попеременно активизируются пересекающиеся плоскости скольжения. Формирование технологических несплошностей возможно также за счет усадки металла в ходе кристаллизации, при сварке, в процессе прессования и спекания порошковых материалов.

### Лекция № 3. Холодная пластическая деформация

#### План

- 3.1. Картина пластической деформации монокристалла
- 3.2. Физическая природа пластического течения монокристалла
- 3.3. Холодная пластическая деформация поликристаллов
- 3.4. Упрочнение при холодной пластической деформации металлов
- 3.5. Влияние холодной пластической деформации на свойства металлов

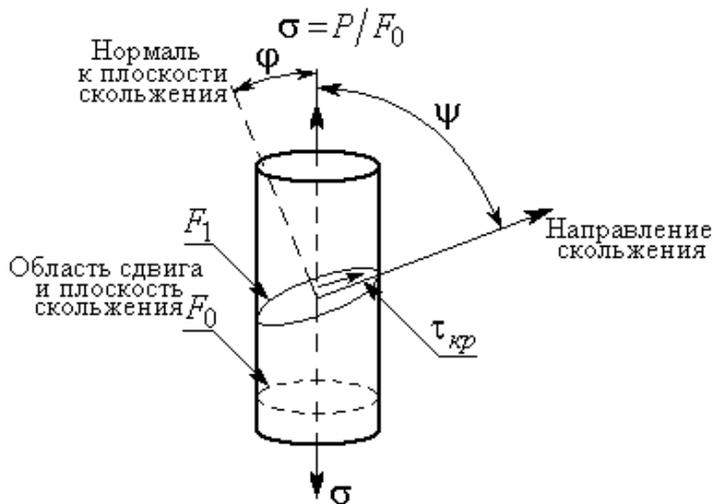
#### 3.1. Картина пластической деформации монокристалла

О закономерностях развития пластической деформации судят обычно по диаграмме растяжения, обеспечивающего однородную деформацию по толщине и длине образца. В результате приложения к кристаллу внешних напряжений появляется сила, действующая внутри кристалла в плоскости скольжения (плоскость скольжения – кристаллографическая плоскость, по которой происходит перемещение одной части кристалла по отношению к другой). Эта сила действует вдоль плоскости скольжения и ориентирована в монокристалле в направлении развития пластической деформации. Напряжение, при котором в чистых монокристаллах металлов начинается скольжение (пластическая деформация), зависит от типа упаковки кристаллической решетки, от характеристик сил связи между атомами, температуры деформирования и от ориентации активных плоскостей скольжения.

Скольжение начинается, когда сдвиговое (касательное) напряжение  $\tau$  в плоскости скольжения в направлении скольжения достигнет определенного уровня, называемого приведенным критическим напряжением сдвига  $\tau_{кр}^{np}$  (рис. 1.12).

Движение дислокаций в плоскости скольжения вызвано приложением нормального напряжения вдоль оси образца.

Пусть  $F_0$  – площадь сечения, нормальная по отношению к осевой силе  $P$ , и  $F_1$  – площадь сдвига в плоскости скольжения под действием  $P_r$ .



**Рис. 1.12.** Схема возникновения приведенного критического напряжения сдвига в монокристалле

$$\tau_{кр}^{np} = \frac{P \cos \psi}{F_0 / \cos \varphi} = \sigma_{кр} \cos \psi \cos \varphi. \quad (1.3)$$

Величину  $M = 1/\cos \psi \cos \varphi$  называют ориентационным фактором. Скольжение начинается в той из систем, где  $\tau_{кр}^{np}$  наибольшее (закон Шмидта, 1927 г.). Таким образом, нормальное напряжение  $\sigma_{кр}$ , вызывающее текучесть (пластическую деформацию) в плоскости скольжения, зависит от ориентационного фактора  $M$ :  $\sigma_{кр} = M\tau_{кр}^{np}$ . Для чистых монокристаллов с ГПУ-решеткой с постоянным значением приведенного критического напряжения сдвига в плоскости скольжения  $\sigma_{кр}$  менялось более чем в 100 раз в зависимости от ориентационного фактора, т.е. от расположения плоскости по отношению к оси нагружения.

В табл. 1.3 приведены значения  $\tau_{кр}$  для некоторых чистых металлов при комнатной температуре.

Скольжение развивается по плоскостям и направлениям, на которых плотность атомов максимальна. Плоскость скольжения вместе с направлением скольжения, принадлежащим этой плоскости, образует систему скольжения. Количество систем скольжения неодинаково в металлах с разным типом решеток.

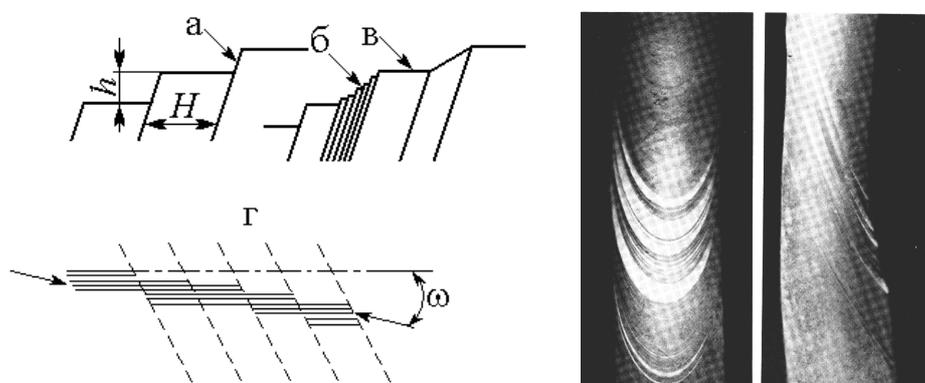
Ориентация плоскости скольжения задана углами  $\varphi$  и  $\psi$ . Следовательно, касательное напряжение, обуславливающее движение дислокации в направлении скольжения, будет:  $\tau_{кр} = P_r / F_1$  ( $P_r = P \cos \psi$  и  $F_1 = F_0 / \cos \varphi$ ). Тогда в начальный момент скольжения приведенное критическое напряжение сдвига

Системы скольжения и приведенные критические напряжения сдвига для монокристаллов при комнатной температуре

Металл	Тип упаковки	Чистота, %	Плоскости скольжения	Направление скольжения	Критическое напряжение сдвига, МПа
Zn	ГПУ	99,999	(0001)	$[11\bar{2}1]$	0,18
Cu	ГЦК	99,999	(111)	$[1\bar{1}1]$	0,65
		99,98	(111)	–	0,94
Fe	ОЦК	99,96	(110), (112), (123)	$[\bar{1}11]$	27,5

У металлов с ГЦК-решеткой (Cu, Al, Ni и др.) 12 эквивалентных систем скольжения. В металлах с ОЦК-решеткой количество систем скольжения составляет 48. У металлов с ГП-решеткой при  $c/a \geq 1,63$  (Mg, Zn) скольжение развивается по плоскости базиса, в которой находятся три эквивалентных направления. Эти металлы менее пластичны, чем металлы с ОЦК- и ГЦК-решетками.

Рельеф скольжения. Элементарный акт сдвига – это смещение одной части кристалла относительно другой (рис. 1.13).



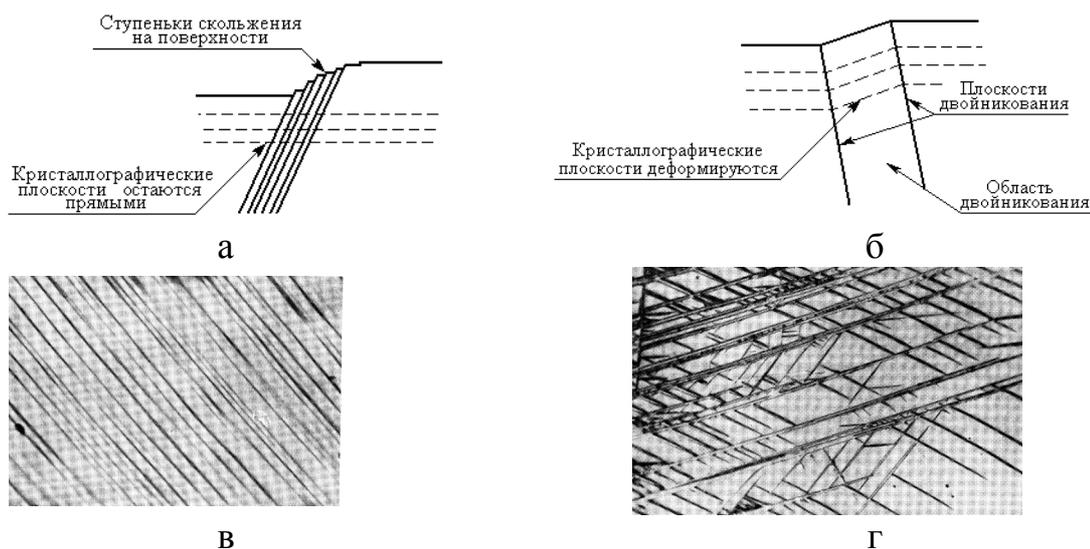
**Рис. 1.13.** Схема рельефа скольжения на поверхности монокристалла при растяжении:  
 а – одиночные линии скольжения; б – полоса скольжения;  
 в – пачка скольжения; г – «вид сверху» (поворот полосы скольжения)  
 и микрорельеф полос скольжения прямо и сбоку образца монокристалла цинка (Е. Parker)

Ступенька, видимая под микроскопом на полированной поверхности образца, называется линией скольжения. Линия скольжения – след пересечения плоскости скольжения с поверхностью образца ( $h$  – высота рельефа,  $H$  – шаг линий). По мере увеличения нагрузки деформация развивается неоднородно, линии скольжения рас-

полагаются на различном расстоянии одна от другой. Группы близкорасположенных параллельных линий скольжения образуют полосы скольжения. Полоса скольжения – образование на поверхности металла, состоящее из группы следов скольжения (линий скольжения). Полосами скольжения монокристалл разбивается на пачки скольжения (или блоки). Пачка скольжения – это область кристалла между полосами скольжения. Расстояние между отдельными линиями в полосе скольжения составляет порядка  $10^{-5}$  см, между полосами –  $10^{-4}$  см. По мере дальнейшего развития деформации происходит разворот полос скольжения, изменяются их форма и размеры и наступает разрушение.

### 3.2. Физическая природа пластического течения монокристалла

Пластическое деформирование в реальных кристаллах осуществляется путем последовательного перемещения дислокации. Основными дислокационными механизмами проявления микропластичности в металлах являются скольжение и двойникование (рис. 1.14).



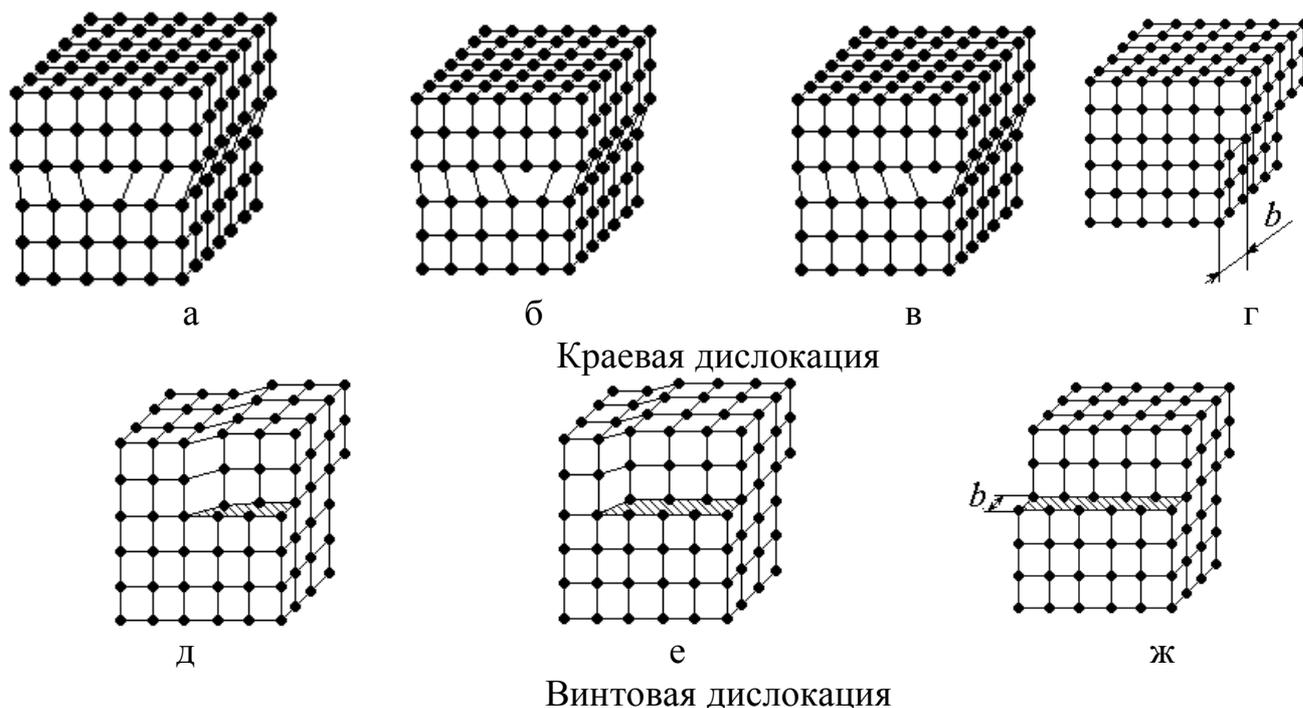
**Рис. 1.14.** Схемы и структуры поверхностей деформированного металла после скольжения (а, в) и двойникования (б, г):  
 в – монокристалл меди после деформации 0,9 %, × 100;  
 г – титан 99,77 %, × 150 (F. Rosi et all )

Дислокация легко движется в той плоскости, в которой находятся дислокационная линия и ее вектор Бюргера.

Скольжение. Перемещение краевой дислокации при сдвиге на одно межатомное расстояние представляет собой согласованную перегруппировку атомов около дислокаций и не сопровождается диффузионным переносом массы. Под действием касательного напряжения ряд атомов, образующих дислокационную линию, вытесняет ближайший ряд атомов в соседней плоскости. Этому способствуют упругие искажения кристалла около дислокации, облегчающие разрыв старых и образование новых

межатомных связей.

Скольжение краевой дислокации. Под действием внешних сил атомы экстраплоскости (рис. 1.15, а) испытывают некоторое смещение на расстояние, не превышающее межатомное. Вследствие этого экстраплоскость упруго взаимодействует с атомами нижней части соседней полной плоскости. В результате разрушается их межатомная связь, и краевая дислокация перемещается на одно межатомное расстояние (рис. 1.15, б). Многократное повторение этого процесса приводит к выходу дислокации на поверхность кристалла, и его верхняя часть сдвигается относительно нижней на межатомное расстояние – возникает ступенька (рис. 1.15, г).



**Рис. 1.15.** Кинетика развития пластической деформации за счет скольжения краевой и винтовой дислокаций в плоскости скольжения

Движение единичной дислокации с выходом на поверхность кристалла и образованием ступеньки представляет собой элементарный акт пластической деформации, при этом величина сдвига  $b$  дискретна и кратна межатомному расстоянию. Макроскопический сдвиг набирается из множества единичных, которые при рассмотрении под оптическим микроскопом наблюдаются в виде линий скольжения. Относительная величина пластического сдвига составит:

$$\varepsilon = b\rho\lambda,$$

где  $\lambda$  – средняя длина пробега дислокаций;  $\rho$  – плотность дислокаций, представляющая собой суммарную длину всех дислокаций, приходящихся на единицу объема кристалла.

Скорость пластической деформации может быть определена как

$$\dot{\varepsilon} = d\varepsilon / dt = b\rho v,$$

где  $v$  – скорость движения дислокации.

В свою очередь скорость пластического течения прямо зависит от скорости перемещения дислокаций и протекает при любых температурах. Скорость скольжения дислокаций может меняться в довольно широких пределах; она зависит от приложенного напряжения, температуры и других факторов. Однако ее величина не может превышать скорость распространения в данном материале упругой деформации, т.е. скорости звука.

В дислокационном сдвиге в каждый момент времени участвуют только те атомы, которые находятся в области дислокации, достаточно разрыва связи между небольшим числом атомов в непосредственной близости от дефекта. Происходит эстафетное перемещение атомов на величину, меньшую межатомной, в результате чего дислокация скользит через весь кристалл на большие расстояния. Этим объясняются низкие опытные значения критических напряжений сдвига в металлах (см. табл. 1.3). Для одновременного смещения одной части кристалла относительно другой (теоретическая прочность) нужно было бы мгновенно разрывать все межатомные связи между плоскостями.

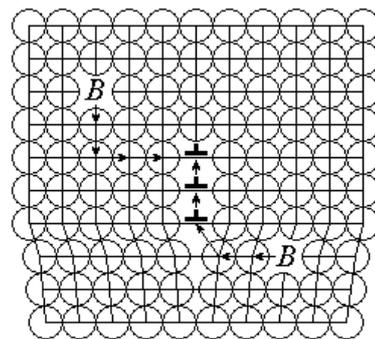
Переползание краевой дислокации. Возможен другой способ движения краевой дислокации – перемещение в направлении, перпендикулярном к плоскости скольжения. Перемещение краевой дислокации по нормали к своей плоскости скольжения путем диффузии атомов или вакансий принципиально отличается от скользящего движения дислокации.

Дислокация может двигаться вверх (положительное переползание) или вниз (отрицательное) относительно исходной плоскости скольжения благодаря миграции точечных дефектов (вакансий  $V$ , межузельных атомов) к краю экстраплоскости (рис. 1.16). Когда к краю полуплоскости подходят вакансии, а атомы с ее кромки уходят в вакантные места (или междоузлия), то краевая дислокация перейдет в вышерасположенную параллельную плоскость скольжения.

Переход в новую плоскость скольжения не всей дислокации, а лишь ее части приводит к образованию на дислокации ступеньки, называемой порогом. Процесс переползания состоит в зарождении порогов и их последующем передвижении вдоль линии дислокации.

Скольжение винтовой дислокации. Для винтовой дислокации не определена однозначно плоскость сдвига, такая дислокация мо-

жет скользить в любой кристаллографической плоскости, переходя из одной плоскости скольжения в другую. Если на пути ее движения встречается какой-либо барьер, то она может продолжить скольжение в другой атомной плоскости, находящейся под углом к первоначальной. Такой процесс является поперечным скольжением. Пройдя некоторый путь в плоскости поперечного скольжения и удалившись от барьера, винтовая дислокация может перейти в атомную плоскость, параллельную исходной. Если такой процесс повторяется многократно, то его называют множественным поперечным скольжением.



**Рис. 1.16.** Переползание дислокации при движении вакансии к краю экстраплоскости

Деформация двойникованием. Пластическая деформация двойникованием происходит при более высоком уровне напряжений, когда скольжение по ряду причин затруднено – при низких температурах и высоких скоростях деформации в ГП- и ОЦК-металлах, при отрицательных температурах в ГЦК чистых металлах и т.д. Двойникование может быть инициировано деформацией (механический двойник) или в результате отжига после пластической деформации (двойник отжига).

Перестройка решетки в новое равновесное положение часто происходит со скоростью, близкой к скорости звука (время образования двойника  $\sim 10^{-6}$  с), сопровождаемая акустическими сигналами – характерным потрескиванием (для регистрации процесса двойникования применяют скоростную съемку).

Плоскость двойникования – это плотноупакованная (с малыми индексами) плоскость зеркального отражения (симметрии) решетки (рис. 1.17). При приложении напряжения сдвига кристалл разворачивается относительно плоскости двойникования.



**Рис. 1.17.** Схема двойникования

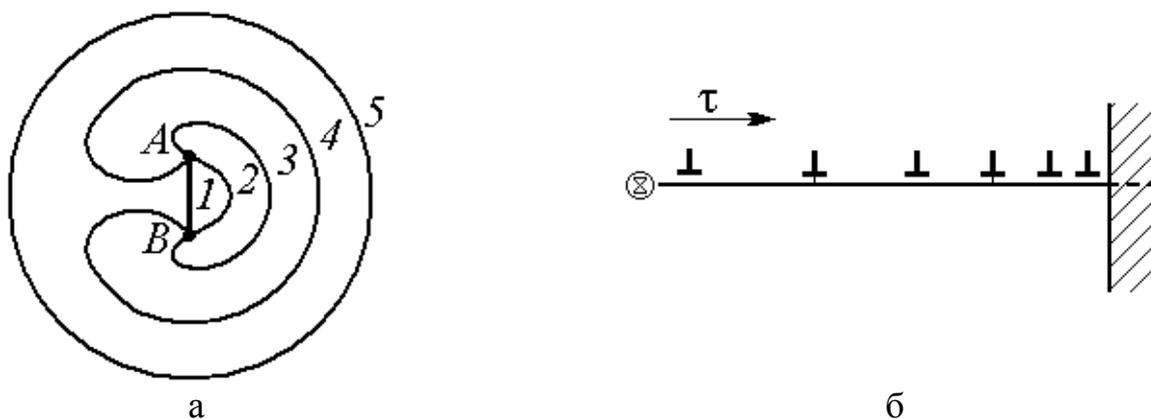
первоначальные позиции в решетке, которые изменили свое положение, темные – конечные позиции этих атомов в области двойникования.

Существуют принципиальные различия процессов скольжения и двойникования. При скольжении ориентация кристалла выше и ниже плоскости скольжения та же, что и до процесса деформирования; при двойниковании она различна по отношению к плоскости двойникования. Скольжение реализуется многократным дискретным перемещением атомов, при двойниковании атом смещается на расстояние много меньшее атомного размера. В отличие от сдвига при скольжении сдвиг при двойниковании полярен, т.е. смещение атомов может происходить только в одну сторону. Двойникование не приводит к значительной остаточной деформации. Металлы, в которых деформация преимущественно реализуется двойникованием, считаются «хрупкими» (например, висмут, сурьма); образование двойников приводит к повышению сопротивления пластической деформации за счет дополнительных барьеров, создаваемых двойниковыми границами.

Размножение дислокаций. Одним из способов размножения дислокаций, действующим в процессе пластического деформирования металлов, является механизм Франка – Рида. Он основан на рассмотрении дислокационной линии, закрепленной на обоих концах (рис. 1.18, а). Дислокационная линия  $AB$  лежит в плоскости скольжения и зафиксирована в точках  $A$  и  $B$  (позиция 1). Точками закрепления могут быть узлы в трехмерной дислокационной сетке,

Область справа от нее не деформирована, слева – атомные плоскости сдвигаются «зеркально» симметричным образом. Каждый атом в области двойникования испытывает гомогенный сдвиг на дистанцию, пропорциональную по расстоянию от плоскости двойникования. Открытые кружки показывают положения атомов, которые не перемещались, пунктирные – их

атомы примеси, частицы выделений и др.



**Рис. 1.18.** Схема стадийности размножения дислокаций (а) и их скопления у барьеров (б)

При постепенном нагружении дислокация движется вперед, и напряжение сдвига достигает критической величины  $\tau_{кр} = Gb/L$ , где  $L$  – длина отрезка  $AB$ . Такое напряжение является максимальным для линии в форме полуокружности (поз. 2); после прохождения этой стадии дислокационная петля становится неустойчивой и непрерывно расширяется (позиция 3-5 ...). У точек закрепления  $A$  и  $B$  образуются два спиральных участка дислокации с противоположными знаками, которые будут перемещаться навстречу друг другу (поз. 4) и при соприкосновении исчезнут (поз. 5). В результате образуется замкнутая дислокационная петля, которая будет продолжать расширяться под действием приложенного напряжения. Одновременно восстанавливается первоначальный дислокационный отрезок  $AB$  (стартовое положение), который может полностью повторить описанный процесс.

Когда в плоскости скольжения имеется препятствие, то дислокации, испущенные источником, скапливаются у этого барьера (см. рис. 1.18, б). Последние дислокации оказывают давление на первые, в результате чего расстояние между ближайшими к препятствию дислокациями оказывается значительно меньшим, чем между теми, которые последними вышли из источника. Возникает некоторое равновесное распределение дислокаций. Около ведущей дислокации (лидера) возникает местная концентрация напряжений  $\tau_1 = n\tau$ , где  $\tau$  – приложенное напряжение;  $n$  – число дислокаций в скоплении. Это означает, что в «голове» плоского скопления из  $n$  дислокаций возникает локальное внутреннее напряжение, которое в  $n$  раз больше приложенного напряжения. Подобные концентрации напряжений играют важную роль, например, в таких явлениях, как упрочнение и разрушение.

Источниками образования и размножения дислокаций могут быть и иные механизмы (вакансионные, зернограничные и т.д.).

Торможение дислокаций. Дислокациям при движении приходится преодолевать близко- и дальнедействующие поля упругих напряжений от препятствий. В первом

случае полями упругих напряжений могут быть напряжения Пайерлса, сопротивления, вызываемые отдельными примесными атомами, зонами типа Гинье – Престона или сегрегациями, центрами радиационных повреждений; во-втором – это могут быть скопления примесных атомов, выделения избыточной фазы, взаимодействие скоплений дислокаций в параллельных плоскостях и др.

Элементарный акт пластической деформации связан с движением дислокаций и локализован по своей природе. При конечных температурах дислокация может преодолеть близкоедействующее препятствие за счет термических флуктуаций; чем выше температура, тем меньшее напряжение необходимо для преодоления препятствия.

Рассмотрим наиболее важные из них с точки зрения развития пластической деформации.

Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами. Образуя в решетке поле напряжений, точечные дефекты взаимодействуют с собственным полем дислокаций, что приводит к понижению упругой энергии кристалла. Особую роль играет реакция краевой дислокации с атомами примесей, приводящая к перераспределению последних. Вследствие упругого взаимодействия примесные атомы образуют вблизи ядра дислокаций скопления, которые называют облаками или атмосферами Коттрелла. Винтовая дислокация не создает областей гидростатического сжатия и растяжения и не способна притягивать точечные дефекты.

Дислокация, связанная атмосферами из примесных атомов, становится мало-подвижной. Скорость движения такой дислокации будет лимитироваться диффузионной подвижностью атомов примеси и, следовательно, будет зависеть от температуры. При нагреве до температуры конденсации  $T_K$  все позиции для примесных атомов вдоль дислокации заняты, такую дислокационную атмосферу называют насыщенной или конденсированной. С повышением температуры выше  $T_K$  концентрация примеси на дислокации экспоненциально падает, атмосферы становятся разбавленными, а пластичность металла возрастает.

Взаимодействие дислокаций. Дислокации взаимодействуют друг с другом своими полями напряжений. Например, взаимодействующие краевые дислокации одного знака в параллельных плоскостях сдвига выстраиваются одна над другой и создают механически устойчивые конфигурации – дислокационные стенки, играющие большую роль в процессах полигонизации, создании межблочных и межзеренных границ. Краевые дислокации разного знака в параллельных плоскостях скольжения также образуют устойчивую конфигурацию. Однако между разноименными дислокациями в одной плоскости сдвига действует только сила притяжения, что может привести к их аннигиляции. В близкорасположенных параллельных плоскостях взаимодействие таких дислокаций приводит к образованию цепочки точечных дефектов.

Пересечение одной дислокации другой вызывает разрыв части дислокационной линии. Образуется ступенька – порог, если она соединяет две части той же дислокации, лежащие в разных плоскостях скольжения, или перегиб, если она остается в плоскости скольжения. Образование порога характерно при пересечении краевых дислокаций, движущихся по нормальным друг к другу плоскостям (их векторы

Бюргерса расположены под прямым углом друг к другу). Ступенька сохраняет ориентировку остальной части дислокации и свободно перемещается вместе с ней.

«Сидячие» дислокации. В кристаллах встречаются дислокации с весьма низкой подвижностью, их принято называть «сидячими». Они являются естественными барьерами для скользящих дислокаций и тем самым существенно ограничивают подвижность дислокаций. «Сидячая» дислокация может возникать при взаимодействии расщепленных дислокаций, скользящих по двум пересекающимся плоскостям.

### 3.3. Холодная пластическая деформация поликристаллов

Большинство металлов и сплавов являются поликристаллами. При комнатных и более низких температурах границы зерен упрочняют металлы и сплавы, являясь барьерами для движения дислокаций. Ориентационный фактор меняется от зерна к зерну. В процессе пластического деформирования металлов дислокации, движущиеся в своей плоскости скольжения, не могут непрерывно переходить от зерна к зерну, так как ориентировка плоскостей скольжения в соседних зернах иная. Это предопределяет различный характер влияния типа упаковки атомов кристаллической решетки на кривые упрочнения  $\sigma(\epsilon)$  – трудность эстафетной передачи деформации от зерна к зерну для ГЦК-металлов с одной плоскостью базисного скольжения (например, Zn) и облегченная передача деформации в кубических системах с ГЦК- и ОЦК-решетками со многими плоскостями скольжения (например, для Fe таких плоскостей – 26).

Макроскопическая модель деформации поликристалла рассматривает деформирование как процесс распада поликристалла на отдельные зерна и последующего их слияния. В результате – образование пустот и перекрытий, связанное с генерацией статистически неравномерно накопленных дислокаций в отдельных зернах. Каждый тип таких несплошностей может разворачиваться и «залечиваться» за счет взаимодействия зернограницных дислокаций. Картина пластического течения может быть представлена и на микроскопическом уровне. Около границы отдельного зерна возникает скопление дислокаций, а напряжения от головной дислокации в скоплении передаются через границу и приводят в действие источники Франка – Рида в соседнем зерне. Пластическая деформация транслируется от зерна к зерну, а эффект упрочнения зависит от состава и температуры. Холодное деформирование осуществляют при температурах не выше  $0,3T_{пл}$  (от температуры плавления). При температурах выше  $0,5T_{пл}$  деформация может реализоваться путем скольжения вдоль границ зерен. С повышением температуры деформирования упрочняющий эффект постепенно исчезает. Упрочнение металла в процессе пластической деформации называют наклепом.

Структура металлов и сплавов при деформации. Структура деформированных поликристаллических материалов зависит от многих факторов, таких как тип упаковки кристаллической решетки, химический состав, схема и условия деформирования, степень обжатия, температура и скорость деформации. Основными механизмами реализации пластической деформации являются: скольжение дислокаций и

двойникование, увеличение плотности дислокаций и их взаимодействие с другими структурными несовершенствами.

При деформировании поликристаллов с ОЦК- и ГЦК-решетками деформация зерен начинается сразу по нескольким системам скольжения и сопровождается изгибами и поворотами плоскостей скольжения. Пока общая деформация мала (до 1 %), зерна деформируются неоднородно в силу их разной ориентации по отношению к приложенным нагрузкам. По мере деформирования в металлах повышается концентрация точечных дефектов и плотность дислокаций, прежде всего, за счет генерации новых дислокаций источниками типа Франка – Рида. На ранних стадиях деформирования (3 – 5 %) у границ зерен образуются плоские скопления или объемные сетки дислокаций, имеющие плоский или пространственный характер. Образующийся тип дислокационных скоплений во многом зависит от энергии дефекта упаковки, характерного для металла, т. е. от возможности поперечного скольжения дислокаций.

С ростом степени деформации зерна постепенно вытягиваются в направлении пластического течения. По мере повышения степени предварительной деформации формируется волокнистая структура в направлении прокатки, и при больших степенях границы зерен различаются с трудом. Направление волокнистости зерен определяется способом деформирования.

Одновременно с ростом степени предварительной холодной деформации (более 5 %) образуется внутризеренная ячеистая структура с резко выраженной неоднородностью распределения дислокаций. С увеличением степени деформации размеры ячеек сохраняются практически неизменными, увеличивается лишь плотность дислокации в стенках ячеек.

Текстура деформации. Определенную ориентировку кристаллографических плоскостей и направлений под действием внешних сил называют текстурой. Она зависит от способа деформирования, кристаллической структуры металла, наличия примесей и условий деформирования. По способу деформирования выделяют волокнистые текстуры и текстуры прокатки. Волокнистые текстуры характерны для процессов деформирования, таких как волочение, прессование или радиальная ковка, при которых зерна вытягиваются в направлении деформации. При прокатке получается более сложная текстура: параллельно плоскости прокатки располагаются плоскость и направление решетки. Для текстур прокатки индексируется не только направление, параллельное направлению прокатки, но также определенная кристаллографическая плоскость, параллельная плоскости прокатки (листа или полосы).

Текстура, вызванная деформацией, обуславливает анизотропию механических и физических свойств поликристаллов. Это позволяет при нормированном выборе текстурованности материала и направления прокатки получать лист с более высокими прочностными характеристиками.

### **3.4. Упрочнение при холодной пластической деформации металлов**

Стадийность процесса упрочнения наиболее полно выявляется при постоянно повышающемся нагружении образцов высокочистых моно- и поликристаллов с

ГЦК-решеткой с низкой начальной плотностью дислокаций  $\sim 10^5 \dots 10^6 \text{ см}^{-2}$  (рис. 1.19).



**Рис. 1.19.** Вид кривой «напряжение – деформация» и соответствующие масштабные уровни деформационного упрочнения

Дислокационные механизмы упрочнения. Пластическая деформация монокристалла по мере нагружения проявляет три характерные стадии на кривой «напряжение – деформация»: легкого (I), множественного (II) скольжения и параболического упрочнения (III). Основной причиной упрочнения на этих стадиях нагружения является резкое повышение плотности дислокаций, а также фрагментирование ячеистой структуры в результате взаимодействия дислокаций и преобразования их в дислокационные скопления.

Линейная стадия упрочнения I (после упругой области кривой деформации) характеризуется очень малым коэффициентом упрочнения. На поверхности кристалла формируются параллельные «атомнотонкие» следы одной системы скольжения (см. рис. 1.14, в). Они появляются сразу и независимо друг от друга, заполняя весь объем. Эта стадия кривой деформации является основной при испытаниях высокочистых ГП-металлов, деформирующихся по базисным плоскостям с плотной упаковкой  $\{0001\}$  (Mg, Zn, Cd). Перемещение дислокаций в поле напряжений происходит по параллельным плоскостям скольжения, пересечение между ними отсутствует. Низкая степень деформационного упрочнения и характер скольжения дислокаций в непересекающихся плоскостях скольжения дали основание для определения I стадии как стадии легкого скольжения.

Стадия множественного скольжения при упрочнении ГЦК-кристалла проявляется по достижении критической плотности линий скольжения при деформации  $\gamma_2$ . Накопление дислокаций и их взаимодействие в нескольких системах вызывает множественное скольжение – линейное упрочнение с высоким коэффициентом упрочнения (II стадия). Характерной для II стадии упрочнения является фрагментация дислокационной структуры. Взаимодействующие между собой дислокации различных систем скольжения формируют вначале рыхлые границы ячеек. Их уплотнение приводит к образованию плоских субграниц с разворотом  $\omega$

(1...2 °) и свободных от дислокаций фрагментов толщиной  $\sim 0,1...0,5$  мкм. Вторичное скольжение поворачивает «старые» полосы из первичной плоскости скольжения. Как только главным фактором упрочнения станут поля скоплений дислокаций, наступает II стадия упрочнения, а напряжение течения определяется плотностью этих скоплений дислокаций  $\rho$ .

Коэффициент упрочнения не зависит от плотности дислокаций в скоплениях: ячеистая структура, которая, раз сформировавшись, сохраняет неравномерность распределения дислокаций между объемом и границей ячеек (1:5) при любой большей деформации.

Стадия параболического упрочнения III проходит при достаточно высоких плотностях дислокаций, когда часть дислокаций теряется из-за реакций между ними и аннигиляции (динамический возврат). Коэффициент упрочнения  $\theta_{III}$  монотонно убывает.

По следам скольжения и дислокационной структуре стадии II и III мало отличимы. Однако полосы скольжения на III стадии короче, а реакции встречи дислокаций с препятствиями характеризуются поперечным (вихревым) скольжением – появлением грубых полос скольжения с частыми следами поперечного сдвига, а при высокой температуре – переползанием. Степень развития этого явления зависит от величины энергии упаковки металла. При относительно малой энергии дефекта упаковки металла (например, медь) для поперечного скольжения необходима значительная энергия активации, и III стадия при комнатной температуре достигается при больших напряжениях. При большой энергии дефекта упаковки (например, алюминий) III стадия упрочнения при комнатной температуре начинается рано.

Мезо- и макроструктурные механизмы упрочнения. К ним относят стадию слабого деформационного упрочнения IV и стадию V (см. рис. 1.19), связанную с образованием шейки. Эти стадии связаны с потерей сдвиговой устойчивости нагруженного твердого тела и имеют собственную стадийность преобразования структуры.

Ячеистая структура практически заканчивает свою эволюцию при истинной деформации  $e \sim 0,3...0,4$ , общая плотность дислокаций достигает  $1 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>, ячейки размельчаются до 0,2 мкм. Более высокие деформации не ведут к приросту плотности дислокаций, а меняют структуру при небольшом упрочнении. Границы ячеек никак не связаны с определенной кристаллографической плоскостью. В результате разворот границ нарастает до их полной непроницаемости, превращая их в монокристалле в границы наклона с большим углом разориентировки. Появление в монокристалле границ зерен – результат самоорганизации течения на мезоскопическом уровне 10 – 100 мкм, т. е. много большего характерного элемента структуры (фрагмента  $d_{\phi} < 1$  мкм), но много меньшего размера образца. Такая микроструктура формируется из дисклинаций, а главное отличие этого этапа деформирования – масштабы и эволюция мезоструктуры.

Если сразу инициировать пластическое течение на мезоуровне, то стадийность на диаграммах « $\sigma - \varepsilon$ » проявляется в такой последовательности: одиночное движе-

ние мезополос; множественное движение мезополос; вихревое движение мезообъемов в пределах мезоструктуры (параболическое упрочнение).

Образование шейки на макромасштабном уровне также характеризуется тремя стадиями падения упрочнения. На начальной стадии развиваются непересекающиеся и далеко расположенные друг от друга макрополосы деформации, что сопровождается высокой скоростью снижения коэффициента упрочнения  $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ . Затем сопряженные макрополосы соединяются своими концами, образуя между собой трехгранную призму, а развитие макрополос сопровождается внедрением призмы внутрь образца ( $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$  изменяется слабо). Наконец в области трехгранной призмы и прилегающего материала интенсивно развивается фрагментация образца – в области шейки формируется вихревая диссипативная структура. Эта стадия характеризуется быстрым падением приложенного напряжения и коэффициента  $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ . На данной стадии формирования структуры зарождается трещина и распространяется по ее границам.

Дислокационные механизмы упрочнения для металлов с ОЦК-упаковкой, сплавов, твердорастворное упрочнение, зернограничное упрочнение описаны в работе [8].

### 3.5. Влияние холодной пластической деформации на свойства металлов

В результате холодного пластического деформирования металла (наклепа) изменяются его механические и физические свойства, и тем сильнее, чем больше степень деформации.

По мере роста степени предварительной деформации увеличиваются прочностные характеристики (твердость,  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{0,2}$ ), понижаются пластичность и ударная вязкость ( $\delta$ ,  $\psi$ , KCV) (рис. 1.20).



**Рис. 1.20.** Характер изменения свойств после холодной пластической деформации металлов

Металлы интенсивно наклепываются в начальной стадии деформирования.

Наиболее интенсивное упрочнение характерно для металлов и сплавов с ГЦК-решеткой с минимальной энергией дефектов упаковки – аустенитной стали, никеля. С увеличением степени деформации предел текучести  $\sigma_{0,2}$  растет быстрее временного сопротивления  $\sigma_s$ : временное сопротивление удается повысить в 1,5...3 раза, а предел текучести – в 3...7 раз. У сильнонаклепанных металлов иссякает запас пластичности – соотношение  $\sigma_{0,2}/\sigma_s$  стремится к единице, а удлинение – к нулю.

Такое состояние является предельным, и при попытке продолжить деформирование металл разрушается.

Снижение пластичности при наклепе улучшает обрабатываемость резанием вязких и пластичных материалов (латунь, сплавы алюминия и др.). Наклепанный металл запасает 5...10 % энергии, затраченной на деформирование. Запасенная энергия тратится на образование дефектов решетки (плотность дислокации возрастает до  $10^9 \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ) и на упругие искажения решетки. Деформация в поликристаллических материалах развивается неоднородно, так как отдельные зерна имеют различную ориентировку и не находятся при деформировании в поле одноосной системы напряжений. Деформация неравномерно распределяется не только в объеме тела между зернами, но и внутри зерен и отдельных дефектов. Из-за неоднородности деформации в металлах, согласно классификации Н.Н. Давиденкова, возникают различного уровня внутренние остаточные напряжения – I, II и III рода. По протяженности силового поля после снятия нагрузки остаточные напряжения I рода (макронапряжения) уравниваются в пределах объема тела, II рода (микронапряжения) – в пределах одного порядка с размерами зерен и пачек скольжения и III рода (искажения кристаллической решетки) – в пределах небольших групп атомов.

Особое значение имеют величина и распределение поверхностных остаточных напряжений после наклепа с градиентом напряжений, часто значительно превышающим предел текучести материала. Образование остаточных напряжений в результате неоднородного пластического деформирования встречается во многих технологических процессах (ковка, штамповка, прокатка, волочение, механическая обработка). В высокопрочных материалах это может привести к разрыву готовой заготовки. Поэтому уровень остаточных напряжений (искажений) часто предопределяет эксплуатационные характеристики деформированных материалов и выбор технологии их обработки. Например, для благоприятного распределения остаточных напряжений используется поверхностный наклеп (обкатка роликами, обдувка дробью или обработка специальным инструментом и др.). В результате в поверхностном слое возникают напряжения сжатия, а под ним, на большем расстоянии от поверхности, – напряжения растяжения. Сжимающие напряжения в поверхностных слоях повышают их вязкость, замедляют зарождение усталостных трещин и тем самым увеличивают долговечность работы деталей.

Пластическая деформация влияет на физические и некоторые химические свойства металлических материалов. С увеличением степени деформации повышается удельное электросопротивление (на 2...6 %), у ферромагнетиков, к которым относится большинство сталей, понижаются магнитная проницаемость и остаточная индукция, возрастает коэрцитивная сила. У сплавов такие зависимости могут быть более сложными. Наклеп повышает химическую активность металлов, они легче растворяются в кислотах и склонны к коррозионному растрескиванию. Образование текстуры при деформировании вызывает анизотропию свойств.

## Лекция №4. Влияние нагрева на структуру и свойства металлов

### План

- 4.1. Возврат и рекристаллизация
- 4.2. Горячая обработка металлов давлением

#### 4.1. Возврат и рекристаллизация

В процессе получения изделий из металлов и сплавов холодным деформированием теряется пластичность, накапливаются значительные остаточные напряжения.

Восстановление свойств и переход металла в более стабильное состояние происходит при нагреве. По мере нагрева холоднодеформированного металла проходит серия структурных изменений – возврат, рекристаллизация и рост зерен (рис. 1.21).

Метастабильное состояние деформированного металла вызвано высоким уровнем накопленной внутренней энергии и плотностью (концентрацией) дислокаций и точечных дефектов. Кинетика микро- и субструктурных изменений при нагреве прокатанного на 85 % сплава Al – 0,8% Mg показана на рис. 1.22. После холодной деформации сильно выражена волокнистость зерен в направлении прокатки (рис. 1.22, а), субструктура формируется из сетки ячеек и стенок между ними с очень высокой плотностью дислокаций до  $10^{12}$  см<sup>-2</sup> (рис. 1.22, а').

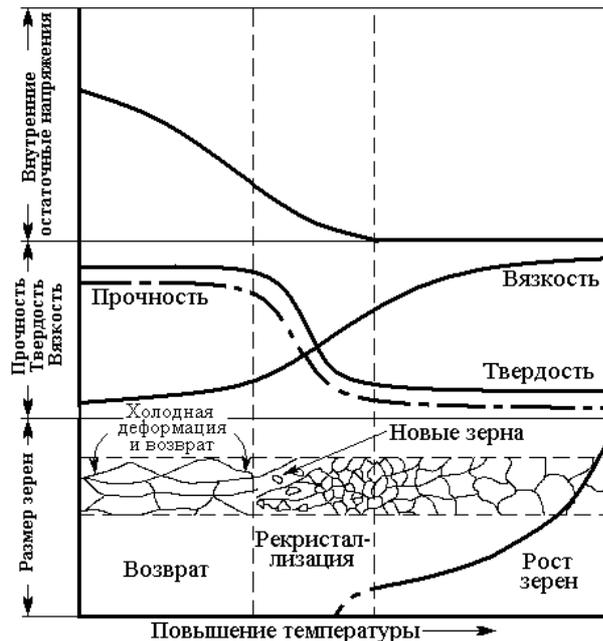
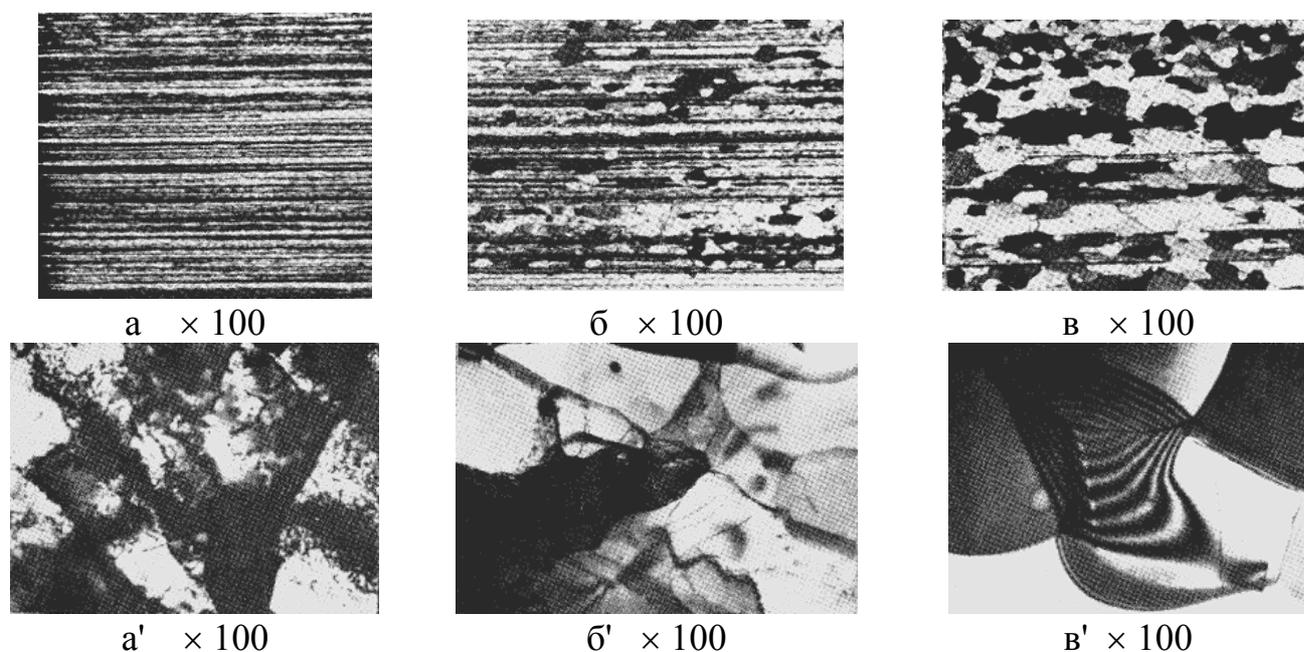


Рис. 1.21. Влияние нагрева (отжига) на изменение структуры и свойств холоднодеформированного металла



**Рис. 1.22.** Влияние нагрева на микроструктуру деформированного на 85 % сплава Al – 0,8% Mg: а, а' – после деформации; б, б' – после деформации и последующего нагрева при 302 °С, 1 ч; в, в' – после деформации и последующего отжига при 316 °С, 1 ч. (After “Metals Handbook”, vol. 7, 8<sup>th</sup> ed. American Society for Metals, 1972, p. 243)

Возвратом называют все изменения тонкой структуры и свойств при нагреве, которые не сопровождаются изменениями микроструктуры деформированного металла, т.е. размера и формы зерен. При нагреве холоднодеформированного сплава в области температур возврата (ниже температур рекристаллизации) внутренняя энергия и уровень остаточных напряжений снижаются в связи с частичной аннигиляцией дислокаций и их перераспределением в низкоэнергетические конфигурации. При температурах до  $0,2T_{пл}$  стадию возврата называют отдыхом. В этом интервале температур происходит снижение избыточной концентрации точечных дефектов (аннигиляция вакансий и межузельных атомов), миграция вакансий к дислокациям и их локальное перераспределение. Это приводит к уменьшению остаточных напряжений и к повышению плотности металла. Изменение свойств начинается с самого начала отжига, без инкубационного периода. Механические свойства при отдыхе меняются незначительно, максимально до 10...15 % от исходного состояния.

Сохраняя волокнистую форму зерен (см. рис. 1.22, б), нагрев способствует формированию в них субструктуры, содержащей сетки дислокаций и малоугловые границы (см. рис. 1.22, б'). Процесс формирования субзерен, разделенных малоугловыми границами, называют полигонизацией. Восстановление прочностных свойств и вязкости металлов на этой стадии нагрева деформированного металла незначительно (см. рис. 1.21). При дальнейшем нагреве до определенных температур в холоднодеформированном металле зарождаются и растут новые зерна на фоне полосовой структуры вдоль прокатки (см. рис. 1.22, б и в). Процесс зарождения и роста новых зерен с меньшим количеством дефектов строения называют рекристаллизацией. В результате рекристаллизации образуются новые, чаще равноосные, зерна и наблю-

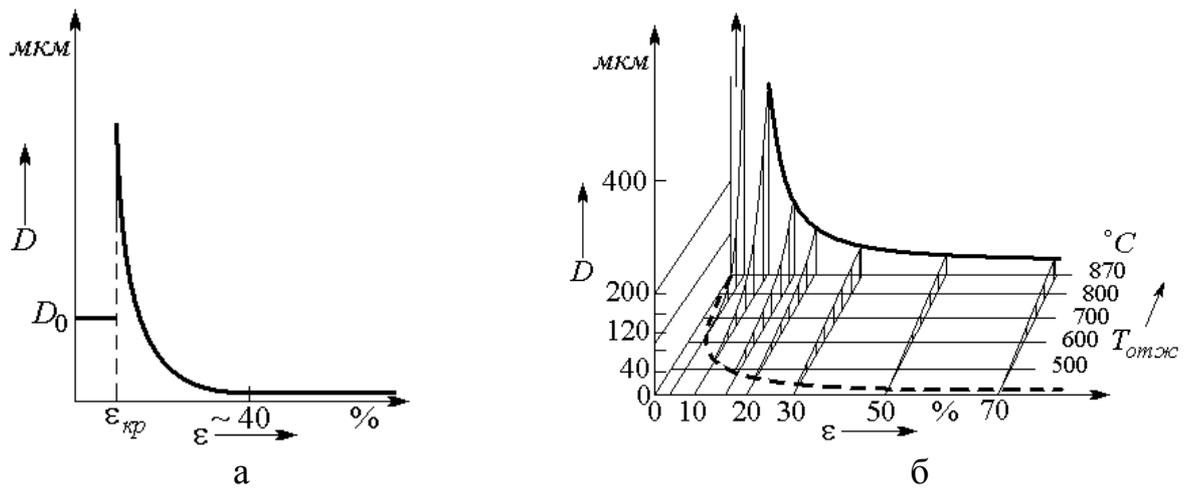
дается рост субзерен (см. рис. 1.22, в'). Для начала высокотемпературной стадии возврата – полигонизации – в наклепанных металлах технической чистоты необходим нагрев до  $0,3...0,35 T_{пл}$ , в сплавах – до более высоких температур. Полигонизация сопровождается перестройкой дислокационной структуры с образованием малоугловых границ, угол разориентировки обычно не превышает  $10^\circ$ . Перераспределение дислокаций, беспорядочно расположенных в деформированном металле, осуществляется при нагреве не только скольжением, но и переползанием дислокаций. Области между границами с низкой плотностью дислокаций называют субзернами или фрагментами.

Стабилизирующая полигонизация развивается в монокристаллах и крупнозернистых поликристаллах после небольших пластических деформаций. Она формирует субзерна, разделенные плоскими малоподвижными дислокационными стенками, весьма устойчивыми при дальнейшем нагреве. Если процесс достаточно полно завершился после отжига при  $(0,3...0,35) T_{пл}$ , то при дальнейшем нагреве даже при более высокой температуре рекристаллизация не развивается. Такая термическая обработка находит широкое использование: для упрочнения и одновременного снижения остаточных напряжений (например, для наклепанных латуней отжиг при  $\sim 300^\circ\text{C}$  устраняет растрескивание); для повышения жаропрочности изделий; для обеспечения достаточной пластичности и высокой прочности при термомеханической обработке сталей за счет динамической полигонизации в процессе деформирования. Закрепление дислокации атомами легирующих элементов и примесей, образование дефектов упаковки, уменьшение концентрации вакансий, что затрудняет переползание дислокации, – все это замедляет развитие полигонизации в сплавах.

Предрекристаллизационная полигонизация развивается в сильнонаклепанных металлах с ячеистой дислокационной структурой. Дислокационные стенки при нагреве уплотняются, сохраняя значительную кривизну и подвижность. Отдельные субзерна могут увеличиться и стать центрами первичной рекристаллизации. В этом случае полигонизация является начальной стадией первичной рекристаллизации.

В зависимости от температуры нагрева и выдержки различают три стадии рекристаллизации: первичную, собирательную и вторичную.

Первичная рекристаллизация связана с зарождением и ростом в деформированном металле более совершенных зерен с высокоугловыми границами и заканчивается образованием новой поликристаллической структуры. Для начала первичной рекристаллизации степень предварительной деформации наклепанного металла должна быть больше критической  $\varepsilon_{кр}$  (рис. 1.23, а). Степень критической деформации соответствует минимальной степени деформации, выше которой при нагреве становится возможной первичная рекристаллизация. При нагреве холоднодеформированного металла, когда его деформация ниже критической, еще не формируется ячеистая дислокационная структура, способная создать зародыши рекристаллизации.



**Рис. 1.23.** Зависимость размера зерна  $D$  рекристаллизованного металла от степени предварительной деформации (а) и диаграмма рекристаллизации технически чистого железа (б):  
 $D_0$  – размер исходного зерна

Связь между абсолютной температурой начала рекристаллизации  $T_{рекр}$  и температурой плавления металла  $T_{пл}$  впервые установлена А.А. Бочваром (1927 г.):

$$T_{рекр} / T_{пл} = \text{const} \quad (\text{или } T_{рекр} = aT_{пл}).$$

Коэффициент  $a$  определяет степень чистоты металла: для высокочистых металлов  $a \sim 0,1 \dots 0,2$ ; для металлов технически чистых –  $0,3 \dots 0,4$ ; для твердых растворов –  $0,5 \dots 0,6$ ; для тугоплавких металлов и сплавов –  $0,7 \dots 0,8$ . С увеличением степени деформации коэффициент  $a$  уменьшается.

На стадии первичной рекристаллизации зародыши новых зерен возникают в местах наибольшей локальной деформации – на стыке границ зерен. Зерна растут за счет движения высокоугловых границ через наклепанный металл. В таком зерне плотность дислокации и других дефектов минимальна, в наклепанном металле – максимальна. Первичная рекристаллизация заканчивается при полном замещении новыми зернами всего объема деформированного металла, последний приобретает равновесную структуру с минимальным количеством дефектов кристаллического строения. Свойства металла после рекристаллизации близки к свойствам отожженного металла. Первичная рекристаллизация ускоряется при высоких скоростях нагрева ( $\sim 1000$  °C/с, индукционный нагрев или непосредственное пропускание электрического тока через наклепанный металл), где она развивается и заканчивает формирование мелкозернистой структуры за несколько секунд вместо нескольких часов.

Собирательная рекристаллизация представляет собой самопроизвольный процесс роста зерен, образовавшихся на стадии первичной рекристаллизации, за счет соседних зерен. Термодинамическим стимулом для роста зерен является минимизация поверхностной энергии, связанная с уменьшением протяженности суммарной поверхности зерен. Рост зерен замедляется, когда примесные атомы находятся в

твердом растворе или образуют частицы избыточной фазы, с повышением температуры рост зерен ускоряется. Собирабельная рекристаллизация тормозится, когда зерна становятся многогранниками с плоскими гранями, а углы между соседними гранями составляют 120°.

Вторичная рекристаллизация – это стадия неравномерного роста одних зерен по сравнению с другими. В результате формируется конгломерат зерен-гигантов, резко различных по размерам. Механические свойства подобной разноразмерной структуры хуже, чем свойства однородной структуры рекристаллизованного металла. Вторичной рекристаллизации соответствуют высокие температуры нагрева наклепанного металла.

Хорошо известно, что механические свойства во многом определяются размером зерен в металлах и сплавах. Мелкозернистые металлы и сплавы обладают повышенной прочностью и пластичностью, крупнозернистые техническое железо и трансформаторная сталь обеспечивают наиболее высокие магнитные свойства, жаропрочные сплавы используются с определенным, нормированным размером зерен. Размер зерен, образующихся в результате рекристаллизации, зависит от химического состава сплава, размера исходного зерна, скорости нагрева и от определяющих процесс факторов – степени пластической деформации и температуры, при которой происходила ре-кристаллизация. Увеличение выдержки при нагреве также способствует росту зерен, но эффект значительно меньше, чем при повышении температуры нагрева. Зависимость размера зерен  $D$  от степени предварительной пластической деформации  $\epsilon$  и от температуры последующего рекристаллизационного отжига  $T_{отж}$  при его одинаковой продолжительности представляют при помощи диаграмм рекристаллизации I рода (см. рис. 1.23, б). Такие диаграммы позволяют выбрать в первом приближении режим рекристаллизационного отжига.

Рекристаллизованные металлы, как правило, однородны по свойствам и анизотропии не обнаруживают. Однако в некоторых случаях возможна предпочтительная кристаллографическая ориентация зерен, которую называют текстурой рекристаллизации. Она определяется составом, способом предшествующей обработки (прокатка, волочение и т.д.) и условиями проведения отжига. В зависимости от температуры отжига текстура рекристаллизации может либо сохранять текстуру деформации (например, ГЦК-металлы при низкой температуре), либо формировать отличную текстуру рекристаллизации или ее устранять (например, Cu, Al, Fe и другие металлы при высоких температурах отжига).

В ряде случаев возникающая анизотропия свойств нежелательна. При глубокой штамповке листы должны деформироваться во всех направлениях одинаково для устранения технологических дефектов – складчатости, волнистой кромки и т.д. С другой стороны, вызванная текстурой анизотропия имеет определенное практическое значение для сплавов с особыми физическими свойствами, когда требуется улучшить свойства в определенном направлении изделия. Например, в листах трансформаторной стали образование текстуры дает возможность уменьшить потери на перемагничивание по определенным направлениям листа.

Рекристаллизация многофазных сплавов – более сложный процесс. На зарожде-

ние и рост размера новых зерен влияют различия свойств каждой фазы, характер структуры и объемные соотношения между фазами, размер частиц второй фазы и их дисперсность.

## 4.2. Горячая обработка металлов давлением

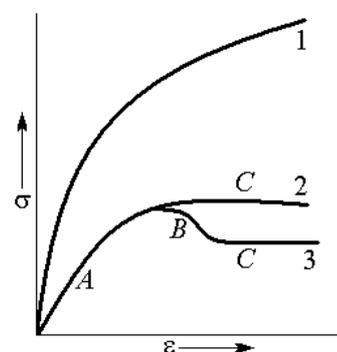
В зависимости от температуры обработки и скорости деформации различают процессы холодной, теплой и горячей обработки металлов давлением.

Сопротивление деформации – это напряжение одноосного растяжения (сжатия), при котором осуществляется пластическая деформация. Горячую деформацию производят при температурах выше  $0,6T_{пл}$  (при температурах выше температуры рекристаллизации). Основную роль играют процессы разупрочнения, когда с большой скоростью развиваются динамические процессы возврата, полигонизации и рекристаллизации.

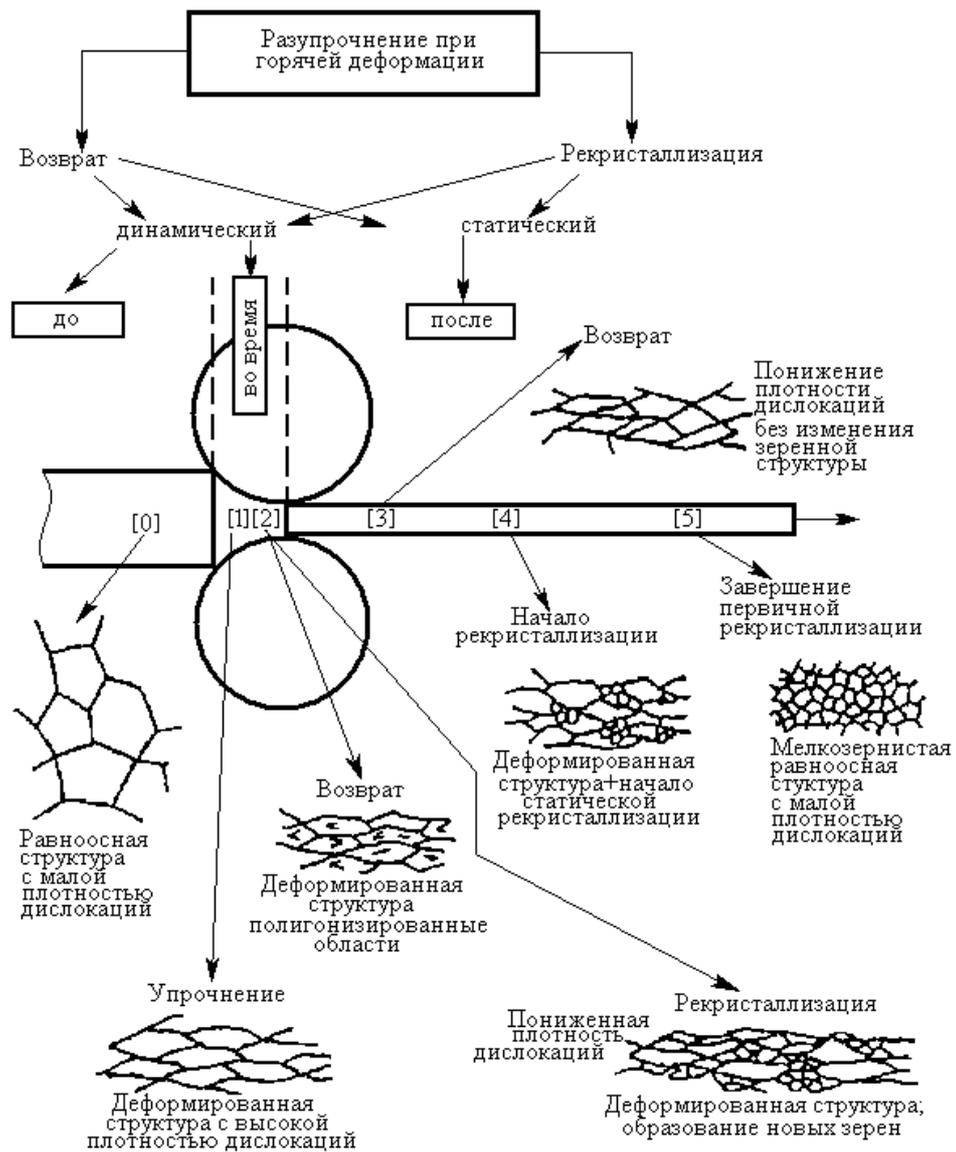
При холодном деформировании сопротивление деформации  $\sigma$  возрастает по мере роста степени деформации  $\varepsilon$  (рис. 1.24, кривая 1), при горячем – характерна стадия установившегося течения (рис. 1.24, кривые 2, 3), когда величина  $\sigma$  перестает зависеть от  $\varepsilon$ . После стадии упрочнения за счет роста плотности дислокаций (*A*) идет эффективное разупрочнение с различной глубиной (*B* и *C*). На стадии установившегося течения (участок *C* на кривых 2 и 3) упрочнение и разупрочнение практически компенсируют друг друга.

Совокупность процессов упрочнения и разупрочнения, их последовательность и полнота протекания определяют конечную структуру горячедеформированных металлов (рис. 1.25).

Начальная структура недеформированной стали состоит из равноосных зерен с малой плотностью дислокаций. На входе в пространство между валками (очаг деформации) степень деформации максимальна, быстро возникает состояние горячего наклепа, формируется волокнистая структура с высокой плотностью дислокаций. По мере продвижения металла в очаге скорость деформации падает, что создает условия для последовательного развития процессов динамического разупрочнения – возврата и рекристаллизации разупрочнения. Благодаря разупрочнению обеспечивается деформирование с большими степенями деформации за одну операцию.



**Рис. 1.24.** Зависимость сопротивления пластическому деформированию от степени холодной (1) и горячей (2, 3) деформации



**Рис. 1.25.** Схема структурообразования при горячей прокатке стальной полосы в гладких валах (по Ленерту)

Возможны различные варианты развития процесса разупрочнения. Во-первых, на стадии возврата образуется субзеренная (полигонизированная) структура. Для некоторых металлов эта структура устойчива и тормозит последующую статическую рекристаллизацию. Для таких металлов процесс разупрочнения заканчивается на этом этапе. Во-вторых, в ходе горячей обработки образование субзерен подавлено, и сразу развиваются процессы динамической рекристаллизации – образование и рост зародышей новых зерен. Как правило, в условиях горячей обработки процесс формирования новых равновесных зерен не успевает завершиться и заканчивается во время последеформационной выдержки (паузы) или при последующем медленном охлаждении. Изменяя параметры прокатки (скорость деформации и скорость охлаждения), можно регулировать структуру металла и его свойства. Упрочнение металлов при деформировании выше  $0,6T_{пл}$  можно сохранить лишь резким охлаждением, не дожидаясь снятия наклепа вследствие протекания процесса разупрочне-

ния.

Диаграммы рекристаллизации II рода при горячей обработке металлов давлением отображают зависимости среднего размера зерна  $D$  от степени предварительной деформации  $\varepsilon$  и от температуры  $T_{обр}$ , при которой проводилась горячая деформация (без проведения специального последеформационного отжига). В табл. 1.4 приведены температуры рекристаллизации  $T_{рек}$ , рекомендуемые температуры рекристаллизационного отжига и горячей обработки некоторых металлов давлением.

Таблица 1.4

Температуры рекристаллизации и горячей обработки  
некоторых металлов

Металл	$T_{рек}$ , °С	Температура рекристаллизационного отжига, °С	Температура горячей обработки давлением, °С
Железо	450	600...700	1300...800
Медь	270	450...500	800...600
Латунь	250	400...500	750...600
Алюминий	50	250...350	450...350
Молибден	900	1400...1600	2000...1400

В большинстве случаев структурная задача горячей обработки давлением – заморозить либо полигонизированную структуру с высокой плотностью дислокаций, либо мелкое рекристаллизованное зерно (лучше их обоюдное формирование). Для этого необходимо воспроизводить исходное состояние и иметь надежные диаграммы рекристаллизации ( $D$ ,  $\varepsilon$ ,  $\dot{\varepsilon}$ ,  $t$  – время), полученные на основе многомерных карт состояний в виде гиперплоскостей  $\lg t(1/T, \lg \varepsilon, \lg \dot{\varepsilon})$  в линеаризующих координатах.

Теплое деформирование проводят при температурах  $(0,3...0,5)T_{пл}$  в верхней температурной области холодной пластической деформации. Основными являются процессы упрочнения при одновременно идущих процессах разупрочнения – поперечное скольжение винтовых и переползание краевых дислокаций. Главное преимущество теплой пластической деформации заключается в снижении нагрузки на инструмент в процессе обработки металла давлением за счет снижения предела текучести. Металл имеет частично рекристаллизованную структуру, что затрудняет процесс деформации с большими обжатиями и сечениями.

Примеси и их распределение оказывают значительное влияние на сопротивление металла деформированию. Сера, находящаяся в стали в виде легкоплавкой сульфидной эвтектики, при пониженных температурах горячего деформирования приводит к оплавлению границ зерен и охрупчиванию (красноломкость) или при повышенных температурах – к расплавлению самого сульфида (горячеломкость). Затрудняют обработку сплавов давлением даже малые примеси Pb, Sb, Bi, Sn, As, Si, P, а загрязнение примесями (например, серой, свинцом) делает сплав вообще непригодным для горячей обработки. Выделения избыточных фаз в виде сеток по грани-

цам зерен ограничивают возможности горячего деформирования, снижают прочностные и пластические свойства. Слитки и заготовки, имеющие литую структуру, обычно подвергают обработке давлением в условиях горячей деформации. Одновременно с образованием волокнистой структуры при деформировании происходит вытягивание в направлении интенсивного течения металла межкристаллитных прослоек в форме прядей, содержащих неметаллические включения, – формируется полосчатая макроструктура. В этом случае анизотропия свойств вдоль и поперек волокна весьма значительна при больших степенях деформации.

Широкое практическое использование горячей обработки металлов давлением достигается за счет: повышения пластичности металлов путем множественного скольжения дислокаций и снижения склонности их к растрескиванию; возможности многих технических металлов и сплавов с повышенной хрупкостью деформироваться

при повышенных температурах (Mg, Zn, W, Mo, системы Cu –Zn, карбиды W, грубозернистые слитки стали и т.п.); технологичности процесса, не требующего дополнительных промежуточных отжигов; возможности получения мелкозернистой заготовки при интенсивной горячей деформации (при высокой скорости деформации образование новых зародышей рекристаллизации идет быстрее, чем рост старых зерен). Поэтому деформирование начинают при высоких температурах при максимальной пластичности металла, а заканчивают при более низких – для устранения роста размера зерна. Регулируя параметры обработки (диаграмма рекристаллизации, скорость деформации), можно получить зерно заданного размера.

В практике использования технологий горячего деформирования металлов имеются определенные ограничения. Одним из них является трудность поддержания постоянной температуры. При получении заготовок малого сечения (тонкие листы, проволока) охлаждение идет настолько быстро, что требуется специальный подогрев валков. Проблемой остается и удаление с поверхности окалины, образовавшейся при горячей деформации. Структура металлов после горячей деформации весьма неоднородна, так как деформация распределяется неравномерно по сечению (в поверхностных слоях возникает более мелкое рекристаллизованное зерно) и при охлаждении температура внутренних слоев остается высокой, что способствует росту размера зерна. Поэтому в горячедеформированном изделии имеется градиент размеров зерен по сечению – от мелких на поверхности до крупных в центре. Расслоение деформированного металла – серьезный фактор, ограничивающий возможность использования жестких режимов деформаций сплавов на основе железа.

## Лекция №5. Виды деформации при обработке металлов давлением

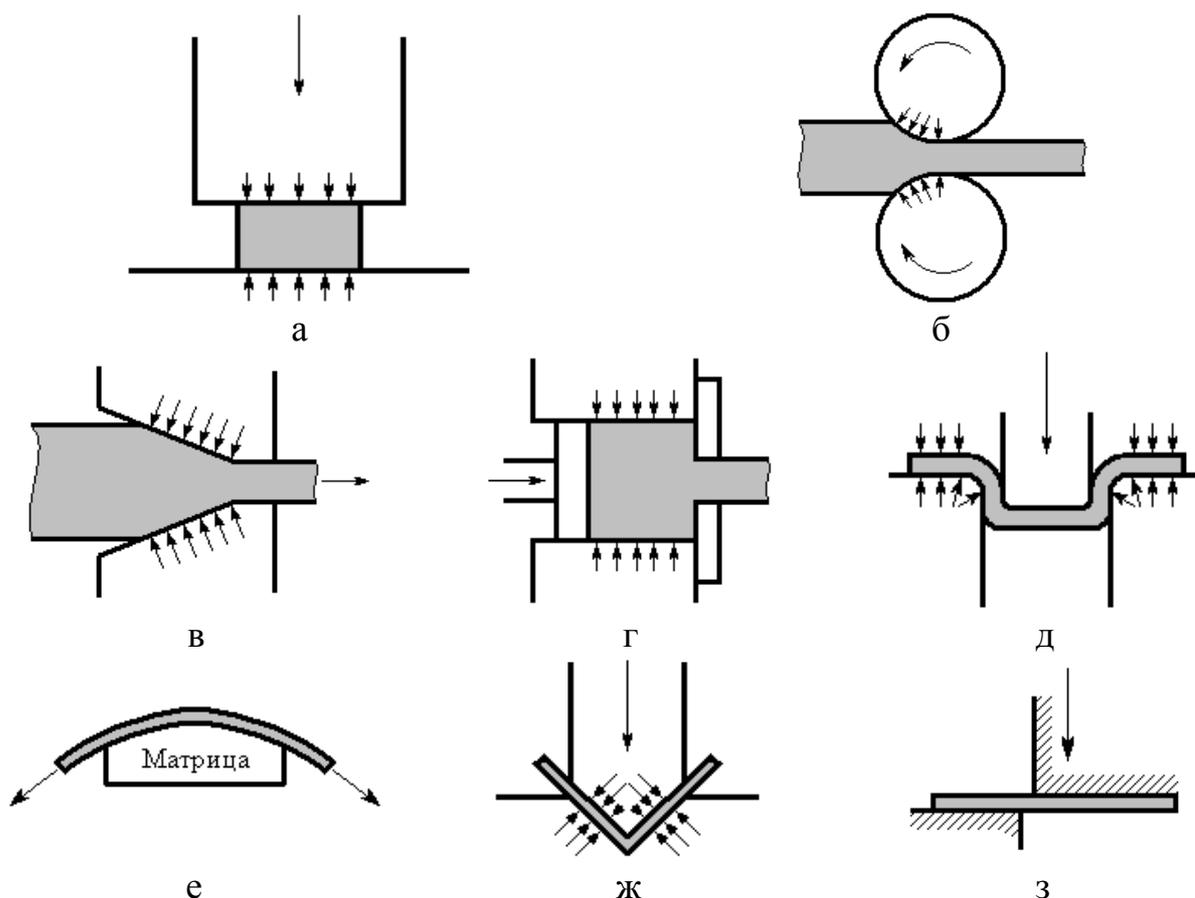
### План

- 5.1. Способы нагружения
- 5.2. Скорость деформации

#### 5.1. Способы нагружения

Обработка давлением стала основой важных технологических процессов изготовления деталей и изменения свойств сплавов. Эффективность использования различных способов обработки металлов давлением зависит от многих факторов – от выбранной схемы внешнего нагружения, температуры, скорости деформации и т.д.

Принципиальные схемы обработки металлов давлением (рис. 1.26) реализуют различные условия внешнего нагружения тела. Согласно классификации Я.Б. Фридмана, напряженные состояния принимают следующих типов: линейное (одноосное растяжение и сжатие), плоское (двухосное растяжение, сжатие и разноименное) и объемное (трехосное растяжение, сжатие и разноименное).



**Рис. 1.26.** Основные технологические схемы обработки металлов давлением:  
а – осадка; б – прокатка; в – волочение; г – выдавливание;  
д – вытяжка; е – протяжка; ж – гибка; з – вырубка

Схема напряженного состояния сильно влияет на характеристики пластичности (сопротивление деформированию) металла в зависимости от соотношений сжимающих и растягивающих напряжений в схеме. Сжимающие напряжения способствуют проявлению пластичности в материалах (при гидростатическом сжатии разрушения вообще не происходит). Чем больше роль сжимающих напряжений в схеме напряженного состояния, тем она считается «мягче».

## 5.2. Скорость деформации

Скорость деформации наряду с приложенным напряжением и температурой является фундаментальным параметром в теории пластической деформации. В широком интервале температур (не только при высокой температуре) с увеличением скорости деформации значения предела текучести повышаются:

$$\sigma_T = k(\dot{\epsilon})^m,$$

где  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформирования;  $K$  и  $m$  – константы, зависящие от прочности материала.

Степень влияния скорости деформации на величину условного предела текучести тем больше, чем крупнее зерно. В случае повышенной температуры деформирование с малыми скоростями приводит к образованию широких полос скольжения с большими промежутками между ними, а также к увеличению пластического течения в каждой полосе. В медленнодеформированных кристаллах обнаруживается больше действующих систем скольжения, чем в кристаллах, подвергнутых быстрому деформированию. Снижение условного предела текучести при уменьшении скорости деформации или при повышении температуры связано с тем, что в обоих случаях достигается наиболее полное использование способности дислокаций к перемещению. В этих условиях процесс скольжения начинается при более низких напряжениях, и этот эффект в согласии с экспериментом тем больше, чем выше степень деформации, допускаемая при определении условного предела текучести, и чем крупнее зерно (меньше препятствий, которые тормозят или усложняют движение дислокаций).

В случае стабильной структуры сплава напряжение, вызывающее пластическое течение при повышенной температуре  $T$ , не может зависеть только от температуры или только от скорости деформации, а определяется совместным влиянием этих переменных.

Влияние скорости нагружения качественно адекватно снижению температуры деформации – с ростом скорости деформации напряжение начала текучести материала возрастает, а пластичность падает. На современном оборудовании для обработки давлением скорость деформации изменяется в широком диапазоне,  $\text{с}^{-1}$ : холодная прокатка (волочение) –  $10 \dots 10^3$ , горячая прокатка –  $1 \dots 10^2$ , экструзия –  $10^{-2} \dots 10$ , прессование –  $10^{-2} \dots 10$ , штамповка на гидравлических прессах –  $10^{-2} \dots 10^2$ , ковка на молоте –  $10 \dots 10^3$ , штамповка взрывом –  $10 \dots 10^2$ . Становится ясным, что учет влияния скорости деформации на свойства металлов необходим при проектировании процессов обработки металлов давлением.

Скорость деформации определяют как изменение степени деформации (или от-

носительное смещение объема) в единицу времени:  $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/d\tau$ , скорость деформирования – как скорость движения деформирующего инструмента. Влияние скорости деформации наиболее эффективно при горячей обработке давлением, протекающей при малых скоростях деформирования. При горячей обработке металлов давлением, кроме описанных выше процессов упрочнения и разупрочнения, проявляется тепловой эффект пластической деформации, когда энергия, затраченная на пластическую деформацию, превращается в основном в теплоту. Коэффициент выхода теплоты для чистых металлов – 0,85...0,90, для сплавов – 0,75...0,85, остальная часть работы расходуется на повышение внутренней энергии металла. Тепловой эффект при горячей деформации по сравнению с холодной меньше за счет меньшего выделения количества теплоты и ее малости по отношению к теплосодержанию нагретого металла. При значительных скоростях деформации за счет резкого тепловыделения в металлах могут возникать эффекты местного пережога, даже когда нагрев проводился до обычно принятых температур. Повышение скорости деформации в условиях, когда рекристаллизация в сплаве развивается медленно, может изменить характер обработки: горячая деформация может перейти в теплую, что приводит к резкому снижению пластичности и к росту напряжения текучести (например, магниевые сплавы при ковке в обычном интервале температур).

Выбор скорости деформации при режимах обработки давлением в интервале температур, близких к проявлению хрупкости в металлах, неоднозначен. Например, у технически чистого железа имеет место охрупчивание при температурах 825...1100 °С. Поэтому ковка заготовок при температурах, близких к 825 °С, с большой скоростью может привести к разогреву, когда армко-железо окажется в зоне хрупкости. И, наоборот, тот же эффект может вывести металл из зоны хрупкости при горячей деформации при температуре 1100 °С. В первом случае имеет место рост напряжения текучести и потеря пластичности, во-втором – восстановление деформационной способности металла. Для многих металлов и сплавов обнаружены критические скорости деформации, при которых они теряют пластичность и становятся хрупкими. Особый интерес вызывают методы обработки давлением при сверхвысоких скоростях деформирования (штамповка взрывом, в сильных магнитных полях и т.п.), когда труднодеформируемые сплавы в обычных условиях допускают практически неограниченную степень деформации.

В практике обработки металлов давлением используются эмпирические соотношения зависимостей напряжения текучести от скорости деформации при заданных температуре и степени деформации. Во многих случаях при расчетах влияние скорости деформации учитывается относительным коэффициентом  $\psi_c$ , показывающим, во сколько раз возрастают напряжения течения в зависимости от скорости деформации (табл. 1.5).

Значения скоростного коэффициента  $\psi_c$  (по С.И. Губкину)

Отношение скоростей деформации $\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1$	Температура деформации, К			
	$\frac{T}{T_{пл}} < 0,3$	$\frac{T}{T_{пл}} = 0,3...0,5$	$\frac{T}{T_{пл}} = 0,5...0,7$	$\frac{T}{T_{пл}} > 0,7$
10	1,05...1,10	1,10...1,15	1,15...1,30	1,30...1,50
100	1,10...1,22	1,22...1,32	1,32...1,70	1,70...2,25
1000	1,16...1,34	1,34...1,52	1,52...2,20	2,20...3,40

## Лекция №6. Температурно-временные условия деформирования

### План

- 6.1. Кратковременный нагрев
- 6.2. Кривые ползучести
- 6.3. Механизмы ползучести
- 6.4. Сверхпластичность

### 6.1. Кратковременный нагрев

Влияние температуры на свойства металлов, в том числе и на их сопротивление пластическому течению при обработке давлением, далеко не однозначно. При нагреве помимо изменения чисто физического состояния материалов могут происходить существенные изменения свойств за счет фазовых и структурных превращений. Например, при повышении температуры деформации пластичность металлов повышается, но если это сопровождается дисперсионным твердением, она уменьшается в несколько раз. Для металлов и сплавов возможны различные температурные уровни начала разупрочнения при кратковременном нагреве.

Оценка физического состояния различных материалов и их свойств должна проводиться в идентичных условиях. Обычно такие испытания проводят при одинаковых температурах и условиях нагружения и на этой основе делают вывод об их потенциальных возможностях при обработке. Это не отвечает критерию физической сопоставимости состояний материалов и условиям подобия проведения самих механических испытаний. Объективная оценка поведения материалов под нагрузкой может быть дана при условии их определения при одинаковых гомологических условиях.

Гомологические температуры и напряжения. Количественным показателем температурного подобия проведения механических испытаний является коэффициент гомологичности  $\alpha$ , который определяется по соотношению  $\alpha = T/T_{пл}$ , где  $T$  – температура испытания, К;  $T_{пл}$  – температура плавления, К. Для обеспечения физического принципа подобия испытания необходимо было бы сопоставлять свойства для меди при комнатной температуре (293 К), а для железа – при 391 К (118 °С). При фиксированном значении действующего напряжения также

нельзя сопоставить физическую картину поведения различных материалов под нагрузкой. Для конкретных материалов она может отвечать напряжениям меньше, равным или больше предела текучести. В этих условиях необходим обоснованный выбор физического критерия отсчета для определения гомологических напряжений (например, в равных долях от значений предела текучести  $\sigma_T$  или от предела выносливости  $\sigma_{-1}$  при усталостных испытаниях).

Сопротивление начальным пластическим деформациям (предел текучести) существенно зависит от температуры. При достаточно низких температурах, приближающихся к абсолютному нулю, скорость разупрочняющих процессов мала: они практически не успевают пройти и повлиять на механические свойства. При высоких температурах, близких к температурам плавления, скорость разупрочнения велика – на основной атермический процесс при горячей деформации накладывается термический процесс разупрочнения. Различие между пределами текучести поли- и монокристалла более ощутимо в области холодной деформации. Особенно сильное влияние сходственной температуры на свойства проявляется в среднем интервале, обуславливающим переход от холодного деформирования к горячему и наоборот. Эти температурные интервалы во многом связаны с исходной фазовой и металлографической структурой деформируемого металла.

Общей закономерностью является факт падения сопротивления сдвигу при повышении определенной температуры за счет трансформации дислокационных, металлографических и фазовых структур и общего снижения эффективности сопротивления препятствию движению дислокаций. Однако процессы накопления пластической деформации развиваются при нагреве весьма интенсивно, когда в дело вступает временной фактор. Уменьшение предела текучести при длительном одновременном воздействии температур и напряжений определяет возможность развития явления ползучести.

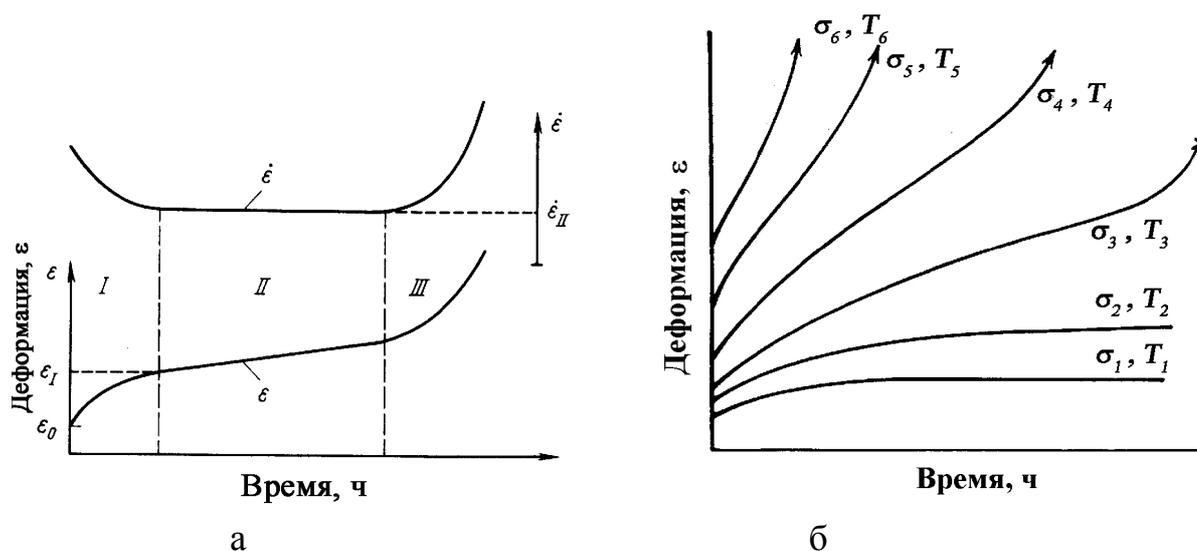
## 6.2. Кривые ползучести

Кинетика процесса. Одним из наиболее ярких проявлений неупругого поведения металлов под нагрузкой является ползучесть.

Ползучесть – это медленная и непрерывная пластическая деформация материала под воздействием постоянной нагрузки. В зависимости от напряжения и температуры, а также от сопротивления, которое данный материал оказывает пластической деформации, ползучесть может постепенно прекратиться или, наоборот, продолжаться вплоть до разрушения. Предел ползучести – наибольшее условное растягивающее напряжение, при котором скорость (или деформация) на установившейся стадии ползучести за определенное время достигает заданной величины. Сопротивление материала разрушению под действием длительно приложенной нагрузки называют длительной прочностью. Предел длительной прочности – условное наибольшее напряжение, под действием которого материал при данной температуре разрушается через заданный промежуток времени.

Результаты испытаний на ползучесть при заданных температуре и напряжении принято представлять в виде кривых ползучести

(рис. 1.27, а).



**Рис. 1.27.** Зависимости относительной деформации  $\varepsilon$  и скорости ползучести  $\dot{\varepsilon}$ :

а – при удлинении от времени при постоянном напряжении;

б – при возрастающих уровнях

приложенных напряжений ( $\sigma_6 > \sigma_5 > \sigma_4 > \sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$ )

и температур ( $T_6 > T_5 > T_4 > T_3 > T_2 > T_1$ )

На этих кривых можно выделить три отчетливо выраженных участка (три стадии ползучести): I – неустановившаяся ползучесть непосредственно после приложения нагрузки – характеризуется постепенным уменьшением скорости деформации (удлинения); II – установившаяся (стационарная) ползучесть – участок с постоянной скоростью удлинения; III – стадия разрушения – незадолго до образования шейки и следующего затем разрушения. Относительное развитие каждой стадии ползучести зависит от приложенной нагрузки  $\sigma$  и температуры  $T$  (см. рис. 1.27, б).

### 6.3. Механизмы ползучести

Ползучесть является в целом термически активируемым процессом. Во многих случаях в одно и то же время параллельно функционирует несколько механизмов ползучести. Когда каждый из них работает независимо от других, то средняя скорость ползучести

$$\dot{\varepsilon} = \sum_i \dot{\varepsilon}_i,$$

где  $\dot{\varepsilon}_i$  – скорость ползучести для  $i$ -го механизма. Если механизмы ползучести реализуются последовательно:

$$\frac{1}{\dot{\varepsilon}} = \sum_i \frac{1}{\dot{\varepsilon}_i},$$

то наиболее медленный из них контролирует деформацию при ползучести.

К настоящему времени проведены достаточно обширные исследования механизмов проявления ползучести в металлах и сплавах, которые позволяют выделить несколько основных.

Дислокационное скольжение вызвано движением дислокаций вдоль плоскостей скольжения и преодолением барьеров за счет термической активации. Этот механизм проявляется при высоких напряжениях ( $\tau/G > 10^{-2}$ ).

Дислокационная ползучесть обусловлена как скольжением дислокаций, так и диффузией вакансий (область реализации составляет:  $10^{-4} < \tau/G < 10^{-2}$ ).

Диффузионная ползучесть обусловлена течением вакансий или межузельных атомов сквозь кристалл под действием приложенных напряжений ( $\tau/G < 10^{-4}$ ).

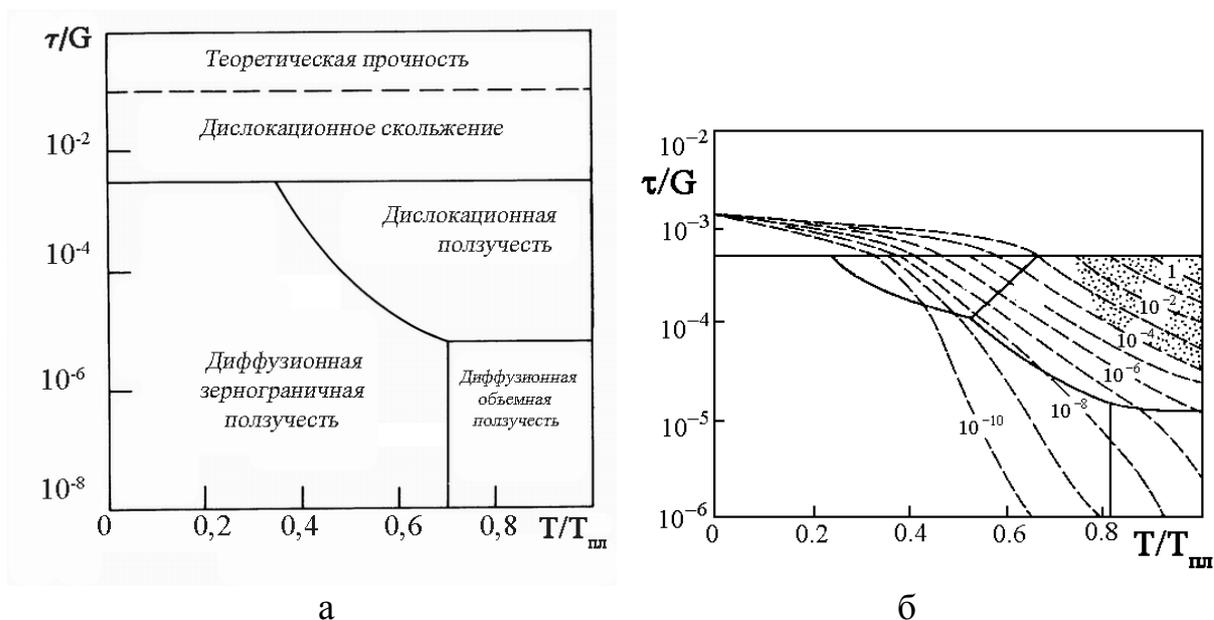
Диффузионная объемная ползучесть Набарро – Херринга (1948 г.) представляет случай пластической деформации, обусловленной направленным перемещением потока вакансий через зерно (или толщину образца) под действием приложенных растягивающих напряжений.

Диффузионная ползучесть по границам зерен Кобла (1963 г.) предполагает, что энергия активации диффузии по границам зерен примерно вдвое ниже, чем для самодиффузии в объеме.

Зернограничное проскальзывание вызвано скольжением границ относительно друг друга. По существу это относится к стадии разрушения, которая в условиях производства заготовок горячей обработкой не допускается.

Практическую иллюстрацию графического отражения проявления различных механизмов деформации при ползучести позволяют получить карты, разработанные М.Ф. Эшби с сотрудниками факультета прикладных наук Гарвардского университета и технических лабораторий Кембриджского университета.

Разные области карты (рис. 1.28, а) отражают доминирующий механизм деформации для заданных напряжений и гомологических температур. Границы разделов между областями отражают эквивалентную возможность реализации нескольких механизмов ползучести. Например, при гомологической температуре 0,8 и низком уровне напряжений деформация развивается путем диффузионного течения (ползучесть Набарро – Херринга). Поддерживая температуру постоянной и повышая напряжения, можно войти в область дислокационной ползучести, а при еще более высоких напряжениях – в область дислокационного скольжения.



**Рис. 1.28.** Обобщенная карта механизмов деформации (а) и ее вид для чистого никеля с размером зерна 32 мкм (б – на пунктирных линиях указана скорость деформации, с $^{-1}$ ).

Заштрихована область динамической рекристаллизации (M.F. Ashby, 1972 г.)

Контуры изодеформационных скоростей могут быть рассчитаны для конкретных материалов из соответствующих соотношений и нанесены на карту механизмов деформации (рис. 1.28, б).

#### 6.4. Сверхпластичность

Способность материалов деформироваться при растяжении до чрезвычайно высоких степеней деформации, сохраняя сильную зависимость напряжения от скорости деформации, впервые отметили Бенгафом (1912 г., двухфазная латунь) и Пирсон (1934 г., эвтектический сплав Bi – Sn). Относительное удлинение при растяжении составляло несколько сотен и даже тысяч процентов при относительно низких напряжениях без локализации деформации и образования шейки; зерна, как правило, оставались равноосными и не изменяли своих малых размеров. Термин «сверхпластичность» (СП) ввел А.А. Бочвар (1945 г.), который и определил ведущую роль межфазной поверхности (объемного соотношения фаз) и аккомодационных процессов (залечивания) для этого вида деформации.

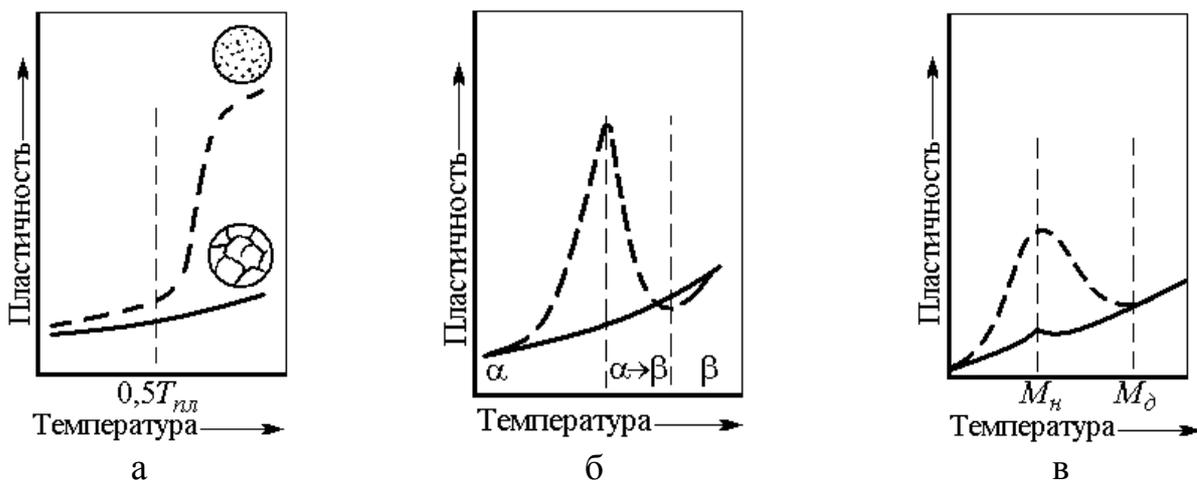
Выделяют три основных вида проявления сверхпластической деформации в металлах и сплавах (рис. 1.29):

- 1) структурная (микрозеренная) при температурах выше  $0,5T_{пл}$ , обусловленная сверхмелким зерном ( $< 10$  мкм) и малой скоростью деформации;
- 2) субкритическая в интервале температур под критической точкой полиморфного превращения;
- 3) фазовая в процессе полиморфных превращений мартенситного типа.

Общим для всех видов сверхпластичности является высокая дисперсность зерен

или фазовых составляющих, весьма развитые межзеренные или межфазовые поверхности и их способность к аккомодации – приспособление друг к другу за счет внутреннего формоизменения без разрушения. В настоящее время насчитывается более 200 металлических материалов, проявляющих эффект сверхпластичности, причем их список непрерывно пополняется. К ним относятся чистые металлы (Al, Cu, Fe, Ni, Ti, Zr, Pb, Be и др.) и сплавы на их осно-ве, углеродистые, легированные и нержавеющей стали, белые чугуны.

Структурная сверхпластичность кристаллических материалов наблюдается в интервале температур  $(0,6...0,85)T_{пл}$  при малых скоростях пластического деформирования порядка  $10^{-5}...10^{-1}$  м/с. Наиболее полно эффект структурной сверхпластичности проявляется в материалах с ультрамелким зерном (0,5...10 мкм) равноосной формы при горячем деформировании металлов. При низких скоростях деформирования ( $10^{-5}...10^{-4}$  м/с) металл течет равномерно, не упрочняясь; относительные удлинения достигают  $10^2...10^3$  %. Чтобы реализовать сверхпластичное состояние, требуется сохранить ультрамелкие зерна в течение всего периода деформирования (порядка десятков минут). С уменьшением размера зерна интервал проявления сверхпластичности смещается в область более высоких скоростей деформирования.



**Рис. 1.29.** Схемы видов проявления сверхпластичности:

а – микроструктурная; б – субкритическая; в – мартенситная для обычного (сплошные линии) и сверхпластического (пунктир) состояний (А.П. Гуляев)

Субкритическая сверхпластичность характеризуется весьма узким интервалом температур (10...20 град.) вблизи температуры фазового перехода  $(0,9...0,98)T_{ФП}$ , когда межфазовая поверхность достигает своей максимальной величины, при скорости деформации около  $10^{-3}$  с<sup>-1</sup>. Здесь  $T_{ФП}$  – температура, при которой наблюдается равенство свободных энергий исходной и новой фаз. Высокая пластичность сплавов проявляется в непосредственной близости к температурам полиморфного превращения типа  $\alpha \Leftrightarrow \beta$  или плавления (например, вблизи точки эвтектоидного превращения  $A_{c1}$  в сталях). В этих случаях микроструктура сохраняется, но кристалличе-

ская решетка основы сплава оказывается неустойчивой, модуль упругости уменьшается в 2...3 раза. Для промышленных двухфазных сплавов наилучшее сочетание их объемов фаз – 1:1, так как при этом максимальна поверхность межфазных границ, а исходная мелкозернистость сохраняется в течение всего срока изготовления изделий (эвтектические и эвтектоидные смеси, двухфазные сплавы титана и т.п.).

Фазовая сверхпластичность мартенситного типа реализуется в температурном интервале  $M_H - M_D$ , где  $M_H$  – температура мартенситного превращения, ниже которой образуется мартенсит при обычном охлаждении;  $M_D$  – температура этого же превращения в условиях внешнего нагружения. Аномально высокая пластичность при мартенситных превращениях наблюдается при температурах, соответствующих 50 % превращения. При этом скорость деформации выше (порядка  $10^{-2} \text{ с}^{-1}$ ), чем при диффузионных превращениях.

Условия деформации. Для сверхпластической деформации характерна необычно высокая чувствительность напряжения течения к изменению скорости деформации. Показатель чувствительности  $m$  определяется из соотношения

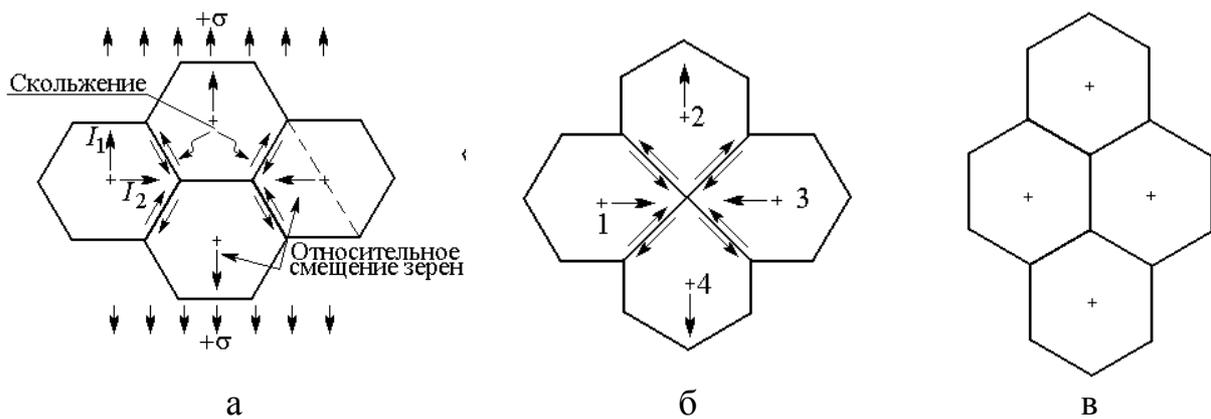
$$\sigma = K(\dot{\epsilon})^m,$$

где  $K$  – константа для данного материала.

При сверхпластичности, в отличие от обычного состояния ( $m < 0,3$ ), показатель  $m$  составляет 0,5...0,7 и в некоторых случаях близок к предельному значению – единице. Это определяет необходимость соблюдения баланса между скоростями деформационного упрочнения и процессов возврата, определяющих возможность аккомодации зерен. Скорость возврата должна быть больше или равна скорости деформационного упрочнения, а эффективная величина деформационного упрочнения  $d\sigma/de$  близка к нулю. Наиболее полно преимущества обработки в режимах сверхпластичности реализуются при деформации в условиях наиболее жестких схем напряженного состояния (бесфильтрное волочение, пневмоформовка, глубокая вытяжка). В режимах сверхпластичности при любом напряженном состоянии снижаются удельные давления и устраняется неоднородность деформации по сечению деталей.

Механизмы проявления сверхпластичности. В условиях сверхпластического деформирования материалы обладают весьма низкой эффективной величиной деформационного упрочнения, что свидетельствует о весьма высокой скорости возврата и о наличии динамического равновесия между этими двумя процессами.

Структурная сверхпластичность реализуется в основном за счет механизма зернограничного проскальзывания (рис. 1.30). При этом скольжение аккомодировано переносом вещества в объеме или вдоль границ.



**Рис. 1.30.** Модель Эшби – Верралла элементарного акта деформации группы из четырех зерен путем обмена смежными зернами, скользящими относительно друг друга:

а – начальное состояние; б – промежуточное состояние; в – конечное состояние.  
 Полная деформация равна 55 %, зерна не изменяют свою форму

Энергия, затраченная на деформацию, расходуется: на диффузию вещества для аккомодации приграничного скольжения; на процессы испускания и поглощения вакансий на межфазных границах; на приграничное скольжение; на изменение площади поверхности границы (при образовании стыка в виде шейки на рис. 1.30, б поверхность границы больше, чем в исходной и конечной позициях). Дискретность процесса межзеренного проскальзывания как во времени, так и в пространстве, занимающем общий объем образца, приводит к возникновению сил, периодически вызывающих поворот отдельных зерен друг относительно друга до тех пор, пока не будет достигнута их более благоприятная ориентация относительно действующего напряжения при нагружении образца. В повороте и вращении участвует все большее количество зерен, и соответственно возрастает занимаемый ими объем.

Во всех случаях действует один механизм деформации – винтовые дислокации взаимодействуют с границами, в результате чего образуются зернограницные дислокации с векторами Бюргерса, параллельными поверхности границы, а также ступеньки на границе с перпендикулярными к ней векторами. Движение зернограницных дислокаций вдоль границы приводит к межзеренному проскальзыванию, а движение ступенек – к миграции границы. Соответственно изменяются и комбинации действующих механизмов – от скольжения по единичным плоскостям и миграции границ к зернограницному проскальзыванию с внутризеренным множественным скольжением и к обычной дислокационной ползучести. Параллельно протекают процессы восстановительной диффузии и непрерывного залечивания субмикроочагов разрушения по границам зерен (аккомодация) со скоростью, равной скорости образования этих очагов. Такими процессами аккомодации зерен при сверхпластичности могут быть диффузионная ползучесть по границам зерен (относительно низкая температура, доминирует граничная диффузия, прочностные свойства существующих фаз примерно одинаковы) или диффузионная объемная (более высокая температура, доминирует объемная диффузия, существенно разные свойства фаз).

В случае фазовой сверхпластичности контролирующим механизмом массопереноса является также проскальзывание по межфазовым границам. При этом температурный интервал области сверхпластичности резко сужается и находится в непосредственной близости к температуре перехода  $T_0$ , а основным механизмом аккомодации при проскальзывании является вакансионная ползучесть по Набарро – Херрингу. Отыскание оптимальной скорости СПД сводится к оценке скорости межзеренного проскальзывания или к определению скорости движения дислокаций вблизи границы «матричная фаза – мартенсит».

Практическое использование эффекта сверхпластичности. Сверхпластическое состояние используют для производства изделий весьма сложной формы при помощи пневматического формования листов или объемного прессования. Ниже приведены наиболее характерные примеры использования эффекта СП при обработке металлических сплавов давлением и термомеханическом упрочнении:

Объект	Методы обработки
Изделия сложной формы и полые – типа баллонов и сильфонов из легких сплавов	Газовая и вакуумная формовка, бесфильтрованное волочение
Изделия из нержавеющей стали и труднодеформируемых сплавов	Глубокая вытяжка, формообразование в жестких штампах
Режущий инструмент (заготовки для фрез и резцов) из литой и порошковой быстрорежущей стали	Объемная штамповка, глубокая вытяжка, прессование
Изделия из высокопрочных титановых сплавов и сталей	Термомеханическое упрочнение

Во многих случаях СП является единственным ресурсом повышения деформационной способности таких традиционно малопластических материалов, как металлокерамика и дисперсно-упрочненные Ni-Cr сплавы, например, типа ЖС6КП, инструментальные стали У8, Р6М5 и т.п. С применением СПД для термомеханического упрочнения ( $\alpha + \beta$ )-титановых сплавов и сталей получено рекордное сочетание прочности, пластичности и вязкости разрушения благодаря формированию мелкоблочной структуры. Помимо обработки давлением и термомеханического упрочнения эффект СП используется для сварки металлов давлением в твердом состоянии и получения волокнистых композиционных материалов методами прокатки или горячего прессования пакетов из сверхпластических металлических фольг, между которыми располагаются ряды высокопрочных керамических волокон.

## Задания для самоконтроля

1. Дайте понятие упругой и пластической деформации и их характеристики.
2. Как определить суммарное значение величины пластической деформации при ступенчатом деформировании заготовки металла? Приведите пример.
3. Если известен модуль нормальной упругости Юнга материала, как найти значение его модуля сдвига?
4. В чем особенности проявления эффектов зуба текучести и Портевена – Ле Шателье при нагружении металлов и сплавов?
5. Опишите эффекты петли гистерезиса, наклепа и эффекта Баушингера при механических испытаниях материалов.
6. Что такое элементарная ячейка кристаллической решетки, какие параметры ее характеризуют? Приведите примеры металлов с разными системами упаковки атомов в кристаллической ячейке.
7. Что такое полиморфизм металлов? Приведите два-три примера.
8. Почему не соответствуют друг другу теоретическая (расчетная) и реальная прочность металлов?
9. Что такое плотность дислокаций и как она зависит от состояния материала?
10. В чем особенности геометрии краевых и винтовых дислокаций и как она контролируется вектором Бюргера?
11. Чем различается строение мало- и высокоугловых границ зерен?
12. Назовите и охарактеризуйте объемные дефекты в кристаллах.
13. Что представляют собой линия скольжения, плоскость скольжения, полоса скольжения?
14. Что отличает процессы скольжения, двойникования и переползания дислокаций при пластической деформации?
15. Опишите механизм размножения дислокаций в поле напряжений.
16. В силу каких причин возможно взаимодействие точечных и линейных дефектов в кристаллах?
17. Перечислите и опишите основные стадии деформационного упрочнения на диаграммах деформации моно- и поликристаллических ГЦК-металлов.
18. Опишите основные стадии кривой деформации на мезоуровне.
19. Как изменяются механические характеристики металлов в процессе пластического деформирования?
20. В каких объемах уравниваются внутренние напряжения I, II и III рода?
21. Что такое текстура деформации и ее роль в формировании свойств?
22. Определите температуры начала рекристаллизации для технически чистых металлов – железа и меди.
23. К каким структурным изменениям в холоднодеформированных металлах приводит процесс полигонизации?
24. В чем различие диаграмм рекристаллизации I и II рода?
25. Возможен ли наклеп металла, если деформация осуществлена при температурах выше температуры рекристаллизации?

26. Что отличает процессы возврата и рекристаллизации в металлах после предварительной холодной обработки давлением?
27. Как влияет полигонизация на последующее развитие процесса рекристаллизации при нагреве металла после предварительной холодной обработки?
28. Как можно регулировать размер зерна при горячей обработке металлов давлением?
29. Опишите в общих чертах схему структурообразования в металлах при горячей прокатке.
30. Как влияет среднее напряжение на пластичность материала? Приведите примеры.
31. Как влияет увеличение скорости деформации на значения предела текучести металлов?
32. Чем различаются понятия «скорость деформации» и «скорость деформирования»?
33. Что такое тепловой эффект пластической деформации?
34. В чем заключается закон аддитивности механизмов упрочнения металлов и сплавов?
35. Какова эффективность различных механизмов упрочнения при кратковременном нагружении при повышенных температурах?
36. Что такое гомологические напряжения и гомологические температуры?
37. Приведите структурные схемы проявления основных видов сверхпластичности.
38. Чему равна эффективная величина коэффициента деформационного упрочнения в условиях сверхпластичного деформирования?  
Укажите классы сплавов на основе железа, для которых возможны эффекты структурной и фазовой сверхпластичности при деформировании.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 2.**

**Методические указания по выполнению лабораторных работ по курсу «Теория обработки металлов давлением»**

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

**ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»**

**Политехнический институт**

**Механико-технологический факультет**

**Кафедра «Механика пластического формоизменения»**

## **ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

### **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ**

Методические указания

Направление подготовки: 150700 «Машиностроение»

Профиль подготовки: Машины и технология обработки металлов давлением

**Форма обучения: очная, заочная, вечерняя**

Квалификация выпускника: бакалавр

Направление подготовки: 151000 Технологические машины и оборудование

Профиль подготовки: Теория и технология штамповки  
анизотропных заготовок

Квалификация выпускника: магистр

**Тула 2012**

## СОДЕРЖАНИЕ

### ВВЕДЕНИЕ

<b>1. Общие требования и методические указания по подготовке, выполнению, оформлению и сдаче лабораторных работ</b> .....	
1.1. Общие требования и методические указания по подготовке и выполнению лабораторных работ.....	
1.2. Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ.....	
1.3. Методика обработки результатов измерений и наблюдений. Правила оформления и сдачи отчетов по лабораторным работам.....	
<b>2. Лабораторная работа № 1. Построение кривых истинных напряжений из опыта растяжения цилиндрических образцов</b> .....	
<b>3. Лабораторная работа № 2. Влияние трения и отношения диаметра образца к его высоте на удельное усилие осадки</b> .....	
<b>4. Лабораторная работа № 3. Построение кривых истинных напряжений из опыта сжатия цилиндрических образцов</b> .....	
<b>5. Лабораторная работа № 4. Влияние скорости деформации на сопротивление деформированию при температуре выше температуры рекристаллизации</b> .....	
<b>6. Лабораторная работа № 5. Исследование деформированного состояния с помощью делительной сетки при сложном нагружении</b> .....	
<b>Приложение</b> .....	

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений интенсификации производства является внедрение технологических процессов, основанных на методах обработки металлов давлением. Преимущество такой технологии заключается в высокой производительности, возможности использования механизированных и автоматизированных линий кузнечно-штамповочных машин, эффективном использовании материалов. Эти преимущества обуславливают опережающее развитие технологии обработки металлов давлением.

Дальнейшее совершенствование технологических процессов обработки давлением немислимо без развития методов анализа и расчета этих процессов, без создания научных основ технологических процессов. Разработка теории процессов обработки металлов давлением основывается, прежде всего, на механике сплошной среды и ее составной части теории пластичности.

Пластичность является состоянием вещества, зависящим от условий деформирования: механической схемы деформации, температуры, степени и скорости деформаций и внешних условий (трения, среды и т.д.).

Для установления термомеханического режима обработки металлов давлением (ОМД) необходимо знать зависимость механических металла от температуры, степени и скорости деформирования. Истинное напряжение при растяжении или сжатии представляет собой напряжение текучести и определяет сопротивление металла деформированию. Эта величина входит во все формулы для определения усилий, необходимых для осуществления ковочно-штамповочных операций. Ниже предлагаются лабораторные работы по курсу «Теория обработки металлов давлением», в которых излагаются экспериментальные методы, позволяющие оценить величину сопротивления материала деформированию в зависимости от степени, скорости деформаций, температуры и условий трения, а также методы анализа деформированного состояния процессов ОМД давлением с помощью делительной сетки при сложном нагружении.

## **1. Общие требования и методические указания по подготовке, выполнению, оформлению и сдаче лабораторных работ**

### **1.1. Общие требования и методические указания по подготовке и выполнению лабораторных работ**

Перед началом выполнения лабораторных работ студенты изучают соответствующие разделы настоящего пособия, после чего преподаватель проверяет подготовленность к работе каждого студента и проводит инструктаж по технике безопасности с соответствующим оформлением в специальном журнале.

Лабораторные работы студенты выполняют под руководством преподавателя и учебного мастера. Включение используемого оборудования в работу производится только учебным мастером, ответственным за правильную и безопасную эксплуатацию машин и приборов.

По окончании работы студенты оформляют отчеты, сдают инструмент, приборы, методические пособия учебному мастеру.

### **1.2. Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ**

Лабораторные работы проводятся на испытательных машинах Р-5, ГМС-50 и копре. Для безопасности работы приспособления и крепления на испытательных машинах должны соответствовать мощности каждой испытательной машины и удовлетворять правилам и условиям эксплуатации.

Перед началом работы учебный мастер проверяет исправность оборудования и приспособлений, а также шкалу регулировки силоизмерительного устройства испытательной машины. При установке приспособлений на испытательной машине необходимо помнить, что приспособление нужно устанавливать только на ту машину, на которую оно спроектировано.

Техника безопасности при работе на копре заключается в том, чтобы предотвратить неожиданное опускание бойка. Для этого необходимо наличие храпового механизма фиксации барабана с тросом. Запрещается оставлять боек в верхнем положении. Пользование приспособлениями должно исключать введение рук в опасную зону движения бойка. При осмотре копра проверяют сохранность металлического троса, работу храпового механизма и временного упора – фиксатора бойка. Храповой механизм включается только во время проведения операции после снятия рукоятки вращения барабана.

Студенты должны выполнять только ту работу, которая предусмотрена в порядке проведения лабораторной работы. Приступая к работе, необходимо правильно организовать рабочее место, не допускать загромождения деталями, отходами, посторонними предметами и мусором, содержать его в чистоте и порядке.

О замеченных недостатках и неисправностях на рабочем месте нужно немедленно сообщить преподавателю или учебному мастеру и до устранения их к работе не приступать.

В случае аварийной ситуации преподаватель и учебный мастер обязаны не-

медленно вывести студентов из помещения лаборатории, принять меры по оказанию первой помощи пострадавшим, сообщить о случившемся заведующему кафедрой.

### **1.3. Методика обработки результатов измерений и наблюдений. Правила оформления и сдачи отчетов по лабораторным работам**

В лабораторных работах исследуются процессы пластического деформирования.

Определение деформаций сводится к вычислению абсолютной деформации и последующего ее пересчета в требуемый вид деформации. Абсолютная деформация определяется измерением начальных и конечных размеров образцов после деформирования.

Для повышения достоверности результатов измерений их проводят не менее трех раз и выбирают среднеарифметическую величину.

Правила оформления отчета следующие:

1. Отчет о лабораторной работе составляется индивидуально после выполнения лабораторной работы.

2. Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- титульный лист (приложение);
- основную часть;
- список использованных источников;
- приложения (при необходимости).

3. Отчет должен быть написан синей или черной пастой или чернилами на листах белой бумаги формата А4 (297x210 мм<sup>2</sup>) или тетради в клетку. В отчете следует использовать сокращения русских слов и словосочетаний по ГОСТ 7.12-94.

4. Титульный лист является первой страницей отчета и должен заполняться по форме (приложение). Преподаватель, принявший отчет, подписывает его и указывает дату приема отчета.

5. Иллюстрации должны быть выполнены карандашом с применением линейки и циркуля. Иллюстрации снабжаются подрисуночными текстами.

6. Цифровые материалы должны оформляться в виде таблиц. Над заголовком справа должно быть написано слово “Таблица” строчными буквами, начиная с прописной.

7. Графики должны строиться на миллиметровой бумаге формата листов отчета и лишь при ее отсутствии - на бумаге в клетку того же формата.

8. Уравнения и формулы следует выделять из текста свободными строками. Пояснения значений символов и числовых коэффициентов, входящих в уравнение или формулу, следует приводить непосредственно после уравнения или формулы.

9. Список использованных источников следует располагать в порядке появления ссылок в тексте отчета. Сведения об источниках, включенных в список, необходимо давать в соответствии с ГОСТ 7.1-94.

10. Приложения следует оформлять как продолжение отчета, располагая их в порядке появления ссылок в тексте. Каждое приложение должно иметь заголовок. Над заголовком справа должно быть написано прописными буквами слово приложение.

Отчет по работе считается принятым, если студент не только правильно и аккуратно его оформил, но и ответил контрольные вопросы преподавателя.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ИСТИННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ИЗ ОПЫТА РАСТЯЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

#### 1. Цель и задачи работы

**Цель работы** – знакомство с методом испытания материала при линейном напряженном состоянии.

**Задачи работы** – построение кривой истинных напряжений в зависимости от относительного сужения  $\sigma_s = f(\psi)$  по результатам обработки экспериментальных данных, полученных при растяжении цилиндрических образцов, и проверка возможности аппроксимации этой экспериментальной кривой уравнением вида

$$\sigma_s = \sigma_{s\epsilon} \frac{\sigma_{s\epsilon}}{1 - \psi_{\epsilon}} \left( \frac{\psi}{\psi_{\epsilon}} \right)^{\frac{\psi}{1 - \psi_{\epsilon}}} . \quad (1)$$

#### 2. Основные теоретические положения

Для определения силовых параметров того или иного технологического процесса обработки металлов давлением необходимо знать истинное сопротивление деформированию  $\sigma_s$ , соответствующее условиям деформации этого процесса (средней степени деформации при холодной обработке, средней скорости деформации и средней температуре при горячей обработке). Эти данные получают с помощью кривой «истинное напряжение – деформация», которая строится по результатам обработки экспериментальных данных, полученных при растяжении образцов.

Процесс холодной пластической деформации сопровождается совокупностью явлений, связанных с изменением механических и физико-химических свойств металла, который называется упрочнением.

С увеличением степени деформации увеличиваются все показатели сопротивления деформированию, уменьшаются показатели пластичности, увеличивается электрическое сопротивление, уменьшаются сопротивление коррозии и теплоемкость.

Согласно гипотезе единой кривой упрочнения при активном нагружении интенсивность напряжений есть вполне определенная функция интенсивности деформаций и вид функции не зависит от вида напряженного состояния. Гипотеза о существовании единой кривой упрочнения позволяет получить зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций из простейших опытов растяжения или сжатия образцов.

В качестве характеристики сопротивления деформированию при линейном растяжении образца принимают истинное напряжение  $\sigma_s$ , представляющее собой частное от деления действующего усилия  $P$  на площадь его поперечного сечения в данный момент деформирования  $F$

$$\sigma_s = P / F \quad (1, a)$$

и условное напряжение  $\sigma$ , представляющее собой частное от деления действующего усилия  $P$  на начальную площадь поперечного сечения образца  $F_0$

$$\sigma = P / F_0. \quad (1, б)$$

Показателями формоизменения образца, оценивающими степень деформации, являются:

– относительное удлинение образца

$$\delta = (l - l_0) / l_0;$$

– относительное сужение площади поперечного сужения образца

$$\psi = (F_0 - F) / F_0;$$

– логарифмическая деформация

$$\varepsilon = \ln(l / l_0),$$

где  $l_0$ ,  $l$  и  $F_0$ ,  $F$  – соответственно начальная и текущая расчетные длины и площади поперечного сечения образца.

Зависимость истинного напряжения от степени деформации называют кривыми упрочнения. Различают кривые упрочнения первого, второго и третьего вида в зависимости от принятого показателя степени деформации  $\delta$ ,  $\psi$  и  $\varepsilon$ .

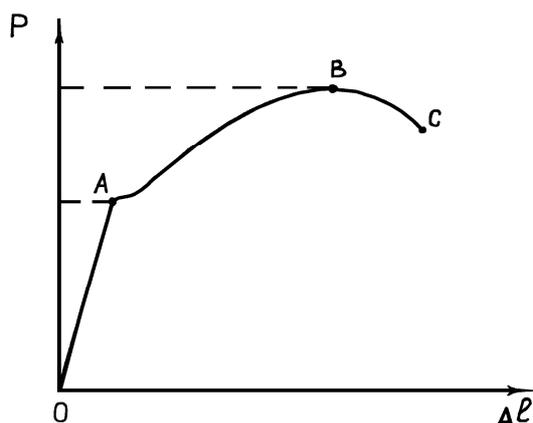


Рис. 1

Цилиндрический образец диаметром  $d_0$  подвергается испытанию на растяжение. В процессе растяжения образца записывается кривая «усилие - абсолютное удлинение» образца (рис. 1).

На этой кривой можно выделить основные характерные участки: упругой (OA), равномерной (AB) и неравномерной (BC) деформации и точки, соответствующие: началу пластической деформации (A), моменту начала образования шейки (B), моменту разрушения (C) образца.

Для построения диаграмм «истинное напряжение – деформация» весь процесс нагружения разбивают на ряд этапов. Величину относительного сужения для каждого  $k$  – го этапа определяют следующим образом

$$\psi_k = \frac{F_0 - F}{F_0} = 1 - \left( \frac{d_k}{d_0} \right)^2, \quad (2)$$

где  $d_0$ ,  $d_k$  – диаметры образца начальный и на  $k$  – ом этапе нагружения соответственно.

Величину истинного напряжения на участке равномерной деформации AB определяем по формуле

$$\sigma_s = \frac{P_k}{F_k} = \frac{4P_k}{\pi d_k^2}, \quad (3)$$

где  $P_k$  – усилие на  $k$ –ом участке нагружения определяется по показаниям силоизмерительной шкалы испытательной машины.

На протяжении всего участка АВ образец деформируется равномерно, т.е. диаметр по всей длине образца в любой момент времени есть величина постоянная.

В тот момент, когда усилие достигает максимума (точка В, рис. 1), равномерная деформация прекращается, так как в образце начинает образовываться шейка. Величина деформации, реализуемая в этот момент в образце, называется максимальной равномерной деформацией и обозначается символом  $\psi_e$ , а соответствующее ей истинное напряжение  $\sigma_{se}$ .

С момента образования шейки вся пластическая деформация образца локализуется в области шейки и одноосное напряженное состояние в образце изменяется на объемное напряженное состояние в области шейки. Напряжения по сечению образца распределены неравномерно, что значительно повышает величину  $\sigma_s$ . Повышение напряжения после появления шейки, вызванное изменением формы растягиваемого образца, называется упрочнением формы.

Истинное напряжение с учетом упрочнения формы определяется по формуле Давиденкова - Спиридоновой

$$\sigma_s^* = \frac{\sigma_s}{1 + \frac{d_k}{8R_k}} = \frac{4P_k}{\pi d_k^2 \left(1 + \frac{d_k}{8R_k}\right)}, \quad (4)$$

где  $d_k$  – диаметр наименьшего поперечного сечения в шейке образца;  $R_k$  – радиус кривизны образующей образца в шейке на  $k$ –ом участке нагружения (рис. 2)

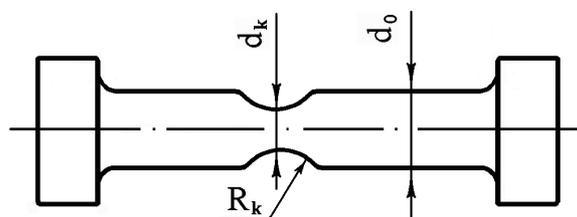


Рис. 2

### 3. Объекты и средства исследования

- 3.1. Стальной цилиндрический образец - 1 шт.
- 3.2. Испытательная машина модели Р-5.
- 3.3. Мерительный инструмент: микрометр, штангенциркуль, радиусомер.

### 4. Подготовка к работе

- 4.1. Изучить содержание настоящей работы.
- 4.2. Подготовить необходимый мерительный инструмент.
- 4.3. Ознакомиться с принципом измерения усилия и текущих размеров образца.
- 4.5. Изучить инструкцию по технике безопасности.

## 5. Программа работы

5.1. Измерить микрометром исходный диаметр образца  $d_0$ .

5.2. Закрепить образец в испытательной машине.

5.3. Растяжение образца вести с записью кривой «усилие - абсолютное удлинение» в масштабе 1:50. Растягивая образец, следить за записываемой диаграммой. При появлении площадки текучести зафиксировать усилие  $P_T$  и определить предел текучести материала

$$\sigma_T = \frac{P}{F_0} = \frac{4P}{\pi d_0^2}.$$

5.4. Начиная с этого момента, останавливать машину и измерять  $d_k$  и  $P_k$  через каждые 200 мм пути по диаграмме «усилие - абсолютное удлинение» до момента достижения максимального усилия.

5.5. При достижении максимального усилия определить величину максимальной равномерной деформации

$$\psi_\epsilon = \frac{F_0 - F_\epsilon}{F_0} = 1 - \frac{F_\epsilon}{F_0} = 1 - \left( \frac{d_\epsilon}{d_0} \right)^2$$

и соответствующее ей истинное напряжение

$$\sigma_{sv} = \frac{P_{\max}}{F_\epsilon} = \frac{4P_{\max}}{\pi d_\epsilon^2},$$

где  $F_\epsilon$  и  $d_\epsilon$  – площадь и диаметр образца при  $P = P_{\max}$ .

Условное напряжение, соответствующее этому моменту

$$\sigma_\epsilon = \frac{P_{\max}}{F_0} = \frac{4P_{\max}}{\pi d_0^2} = \sigma_{sv} (1 - \psi_\epsilon),$$

принято называть временным сопротивлением разрыву.

5.6. Дальнейшие замеры  $d_k$ ,  $P_k$  и  $R_k$  производить через каждые 100 мм по диаграммному аппарату до разрушения образца.

5.7. Полученные данные и вычисленные значения  $\sigma_s$  и  $\psi$  занести в табл. 1.

Таблица 1 - Экспериментальные и расчетные данные

№ этапа	$P$ , кН	$d$ , мм	$R$ , мм	$\sigma_{s \text{ эксп}}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\psi$	$\sigma_{s \text{ теор}}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Примечание
0							
1							
2							
...							
8							

5.8. Построить экспериментальную кривую истинных напряжений по полученным значениям  $\sigma_s$  и  $\psi$ , теоретическую кривую, используя зависимость (1).

## **6. Анализ полученных результатов**

6.1. Сделать заключение о влиянии степени деформации на величину истинных напряжений, о характере согласования экспериментальной и теоретической кривых истинных напряжений.

## **7. Контрольные вопросы**

7.1. Дать определение истинного и условного напряжений.

7.2. На диаграмме «усилие – абсолютное удлинение» показать траекторию процесса «нагрузка – разгрузка».

7.3. Как определить максимальную равномерную деформацию образца, если известны размеры исходного образца и имеется разрушенный образец?

7.4. Что такое пластическая деформация?

7.5. Почему при построении экспериментальной кривой истинных напряжений пренебрегают упругим участком диаграммы?

## **Библиографический список**

1. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1971. - 408 с.

2. Теория обработки металлов давлением. Часть I. Основы теории пластичности и ползучести: Учеб. пособие / В.И. Трегубов, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, С.С. Яковлев; Тул. гос. ун-т. Тула, 2002. - 152 с.

## Лабораторная работа № 2

### ВЛИЯНИЕ ТРЕНИЯ И ОТНОШЕНИЯ ДИАМЕТРА ОБРАЗЦА К ЕГО ВЫСОТЕ НА УДЕЛЬНОЕ УСИЛИЕ ОСАДКИ

#### 1. Цель и задачи работы

**Цель работы** – исследование влияния трения и отношения диаметра образца к его высоте на удельное усилие осадки.

**Задачи работы** – экспериментальная проверка зависимости удельного усилия осадки, полученной инженерным методом, от отношения диаметра образца к его высоте. Определение коэффициента трения на поверхности контакта образца и инструмента.

#### 2. Основные теоретические положения

При осадке на поверхности контакта образца с инструментом возникает сила трения, которая существенно влияет на удельное усилие осадки.

Результаты анализа процесса осадки, проведенного путем интегрирования приближенных уравнений равновесия совместно с приближенным условием пластичности при граничных условиях, заданных в напряжениях, могут быть представлены в виде графиков зависимости безразмерного удельного усилия от геометрических размеров образцов при различных коэффициентах трения (рис. 1).

Анализ графиков показывает, что с увеличением коэффициента трения  $\mu$  и ростом отношения диаметра образца  $D_0$  к высоте  $h_0$  удельное усилие осадки возрастает. При  $D_0/h_0 \leq 1$  удельное усилие осадки не зависит от коэффициента трения и совпадает с пределом текучести материала  $\sigma_s$ .

Графические зависимости, приведенные на рис. 1, совместно с экспериментальными данными по осадке цилиндрических образцов могут быть использованы для определения коэффициента трения на поверхности контакта заготовки и инструмента.

При осадке образца с малым изменением его высоты  $\Delta h \ll h_0$  относительная деформация  $\psi$  определяется следующим образом

$$\psi = \frac{\Delta h}{h_0} = 2 \frac{\Delta D}{D}. \quad (1)$$

Пренебрегая изменением диаметра, так как оно мало по сравнению с диаметром, можно определить удельное усилие осадки по формуле

$$p = \frac{P}{F_0} = \frac{4P}{\pi D_0^2}. \quad (2)$$

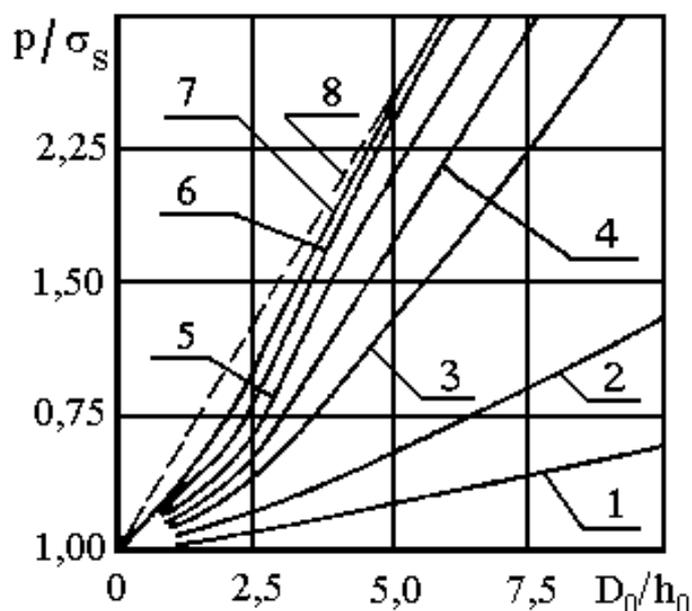


Рис. 1. Зависимость относительного удельного усилия осадки от относительного диаметра образца при коэффициентах трения  $\mu$ :  
 1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,15; 4 – 0,2; 5 – 0,25; 6 – 0,3; 7 – 0,4; 8 – 0,5

Проведя осадку цилиндрических образцов с геометрическими параметрами  $D_0/h_0 \leq 1$ , для ряда степеней деформаций между гладкими, а затем шероховатыми плитами можно убедиться, что удельное усилие осадки  $p$  не зависит от трения и поэтому его можно принять за величину текучести материала  $\sigma_s$ .

Аналогично, проведя осадку низких образцов  $D_0/h_0 > 1$  того же диаметра и до тех же степеней деформаций и измеряя их усилие осадки, можно оценить влияние геометрии образца и условий трения на удельное усилие осадки.

Для определения коэффициента трения необходимо знать величину  $p/\sigma_s$  для низких образцов. Согласно формуле (2) это отношение можно заменить отношением усилий при той же степени деформации, т.е.

$$\left(\frac{p}{\sigma_s}\right)_{\psi} = \left(\frac{P}{P_1}\right)_{\psi}, \quad (3)$$

где  $P_1$  – усилие осадки образца при  $D_0/h_0 \leq 1$ ;  $P$  – усилие осадки образца при  $D_0/h_0 > 1$ .

Используя среднее арифметическое значение  $p/\sigma_s$ , полученное по значениям  $p/\sigma_s$  на каждом этапе деформирования, по графикам на рис. 1 можно найти значение коэффициента трения  $\mu$  на поверхности гладких и шероховатых плит при осадке низких образцов.

Кроме этого, коэффициент трения может быть найден приближенно по формуле Зибеля [1]

$$\mu = \left( \frac{p}{\sigma_s} - 1 \right) \frac{3h_0}{D_0} . \quad (4)$$

### 3. Объекты и средства исследования

3.1. Образцы цилиндрические – 4 шт. двух типов:  $D_0/h_0 \leq 1$  и  $D_0/h_0 > 1$ , материал – свинец.

3.2. Испытательная машина ГМС-50.

3.3. Два комплекта плиток: гладкие и шероховатые.

3.4. Мерительный инструмент: штангенциркуль и два индикатора, установленные по схеме (рис. 2), которыми осуществляют замеры с точностью 0,01 мм. Показания каждого индикатора  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  дают в сумме величину  $\Delta D$ .

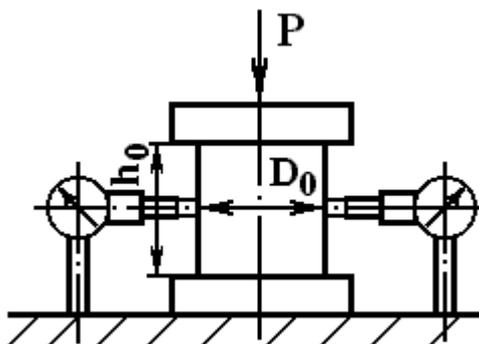


Рис. 2

### 4. Подготовка к работе

4.1. Изучить содержание лабораторной работы.

4.2. Подготовить необходимый мерительный инструмент.

4.3. Ознакомиться с принципом измерения усилия осадки и текущих размеров образца с помощью индикаторов.

4.5. Изучить инструкцию по технике безопасности.

### 5. Программа работы

5.1. Измерить размеры исходных образцов  $D_0$ ,  $h_0$  и вычислить площадь  $F_0$ . Замеры каждого размера делать раз по взаимно перпендикулярным направлениям. В табл. 1 записывается среднее арифметическое всех замеров каждого образца с округлением до 0,01 мм.

Таблица 1 - Размеры исходных образцов

№ образца	$D_0$ , мм	$h_0$ , мм	$D_0/h_0$
1			
2			
3			
4			

5.2. Образцы следует предварительно нагружать до  $P = 10$  кН и при этой нагрузке выставлять на нуле стрелки индикаторов.

5.3. Осадку образцов производить последовательно в четыре этапа с шагом изменения диаметра  $\Delta D = 0,16$  мм. Опыты производить на гладких и шероховатых плитах для образцов каждого типа с регистрацией усилия осадки. Полученные данные заносятся в табл. 2.

Таблица 2 - Экспериментальные данные опытов

Вид образцов	Изменение диаметра $\Delta D$ , мм	Усилие осадки $P$ , кН	
		Шероховатой	Гладкой
Высокие $D_0/h_0 \leq 1$			
Низкие $D_0/h_0 > 1$			

5.4. Для каждого отношения  $D_0/h_0$  изобразить графические зависимости усилия осадки от величины изменения диаметра, как между гладкими, так и шероховатыми плитами.

5.5. Убедившись, что удельное усилие осадки  $p$  при  $D_0/h_0 \leq 1$  не зависит от трения, принимаем его за  $\sigma_s$ , затем вычисляем значения  $p/\sigma_s$  для  $D_0/h_0 > 1$  при различных значениях  $\psi$ . Полученные данные заносятся в табл. 3.

5.6. Определяется среднее значение  $p/\sigma_s$  для гладких и шероховатых плит при  $D_0/h_0 > 1$ .

5.7. Определить коэффициент трения по графику рис. 1.

5.8. Определить коэффициент трения по формуле (4).

Таблица 3 - Расчетные данные при осадке образцов с  $D_0/h_0 > 1$ .

№ этапа	Степень осадки $\psi$	$p/\sigma_s$	
		Шероховатая плита	Гладкая плита
1			
2			
3			
4			
Среднее значение			

## 6. Анализ полученных результатов

6.1. Сделать вывод о влиянии отношения  $D_0/h_0$  на удельное усилие осадки при различных условиях трения на контактной поверхности.

6.2. Сопоставить значения коэффициентов трения, установленные по графику рис. 1 и по приближенной формуле (4).

## 7. Контрольные вопросы

7.1. Чем можно объяснить тот факт, что для принятой степени деформации образцов с  $D_0/h_0 \leq 1$  трение практически не оказывает влияния на значение удельного усилия?

7.2. Какое влияние оказывает трение на контактной поверхности на усилие при осадке образцов с  $D_0/h_0 > 1$ ?

7.3. Как в процессе эксперимента изменяют условия трения на контактной поверхности?

7.4. Почему для фиксации деформации по диаметру устанавливают два индикатора?

7.5. Почему осадка образцов производится при малых степенях деформации?

7.6. Какое максимальное значение может принимать коэффициент трения  $\mu$ ?

## Библиографический список

1. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1971. - 408 с.

2. Яковлев С.П., Смарагдов И.А., Кузнецов В.П. Методы анализа процессов обработки металлов давлением. - Тула, 1976. - 126 с.

## Лабораторная работа № 3

# ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ИСТИННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ИЗ ОПЫТА СЖАТИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

### 1. Цель и задачи работы

**Цель работы** – знакомство с методами испытания материала при линейном напряженном состоянии.

**Задачи работы** – построение кривой истинных напряжений по результатам обработки экспериментальных данных, полученных при осадке цилиндрических образцов, и проверка возможности аппроксимации этой кривой уравнением вида

$$\sigma_s = \sigma_{s0} \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{\varepsilon_0}.$$

### 2. Основные теоретические положения

Для определения силовых параметров того или иного технологического процесса обработки металлов давлением необходимо знать истинное сопротивление деформированию  $\sigma_s$ , соответствующее условиям деформации этого процесса (средней степени деформации при холодной обработке, средней скорости деформации и средней температуре при горячей обработке). Эти данные получают с помощью кривой упрочнения, представляющей собой зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций.

Согласно гипотезе единой кривой упрочнения при активном нагружении интенсивность напряжений есть вполне определенная функция интенсивности деформаций и вид функции не зависит от вида напряженного состояния.

Использование гипотезы единой кривой упрочнения позволяет получить зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций из простейших опытов, обеспечивающих возможность осуществления больших деформаций без разрушения в условиях, возможно близких к простому нагружению.

Известно, что построение достоверной опытной кривой упрочнения из опыта растяжения возможно до значений деформаций, отвечающих равномерной деформации, т.е. до момента образования шейки. При дальнейшем деформировании, т.е. при деформировании с момента начала образования шейки и до разрушения образца, для определения истинного напряжения вводятся различные поправки, учитывающие “упрочнение формы”. Использование этих поправок приводит к погрешностям при построении кривой упрочнения при значительных степенях деформации.

Известно, что при осадке образцов можно получить степени деформаций без разрушения больше, чем при растяжении.

Однако построение экспериментальной кривой упрочнения из опытов на сжатие встречает трудности, связанные с тем, что в плоскости контакта с плитами возникают силы трения. Во всех существующих методиках построения этих кривых стремятся в той или иной мере уменьшить эти силы трения или исключить их влия-

ние.

Предлагаемая методика основана на том, что при осадке образцов с отношением высоты образца к его диаметру больше 1, удельное усилие осадки не зависит от условий трения на торцах образцов. Поэтому в этом случае удельное усилие осадки будет одновременно истинным сопротивлением деформированию, соответствующим данной степени деформации.

Однако, сохраняя отношение  $h/D \geq 1$ , не удастся получить значительной степени деформации, так как начальное отношение  $h_0/D_0$  ограничено устойчивостью цилиндрической формы образца при сжатии. Из этих соображений соотношение начальных размеров образца должно быть  $1 \leq h_0/D_0 < 2$ .

Учитывая эти два требования, для достижения больших степеней деформации предлагается построение кривых упрочнения из опыта сжатия проводить следующим образом. Четыре одинаковых образца  $D_0=10$  мм,  $h_0=18$  мм осаживаются одновременно между гладкими плитами.

Для фиксирования степени осадки и обеспечения безопасности работы используют ограничительные кольца. Высота колец выбирается в зависимости от степени сжатия. По мере осадки кольца меняются до тех пор, пока отношение  $h/D$  для четырех образцов не станет равным 1. При дальнейшей осадке за счет сил трения удельное усилие оказалось бы больше истинного сопротивления деформированию. Поэтому дальнейшей осадке подвергаются составные образцы, составленные из двух поставленных друг на друга осажённых образцов. У такого составного образца начальное отношение размеров  $h_0/D_0$  будет больше 1 (исключаем трение), но меньше 2 (удовлетворяем условию устойчивости).

Проведя осадку двух составных образцов до момента  $h/D=1$ , дальнейшую осадку необходимо проводить на одном составном образце, состоящем из двух составных образцов, полученных на втором этапе.

Применение данной методики позволяет деформировать образцы с большими степенями деформации без потери продольной устойчивости и исключить влияние трения.

В процессе осадки величину логарифмической деформации и относительное уменьшение высоты определяют по формулам

$$\varepsilon = \ln \left( \frac{h_0}{h_i} \right); \quad \psi = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h_i}{h_0}, \quad (1)$$

где  $h_i$  – текущая высота составного образца;  $h_0$  – начальная высота образца (на первом этапе она равна начальной высоте одного образца, на втором – начальной высоте двух образцов, на третьем – начальной высоте четырех образцов).

Величину истинного сопротивления деформированию следует определять по формуле

$$\sigma_s = \frac{P}{F} = \frac{P h_i}{F_0 h_0}, \quad (2)$$

где  $P$  – усилие, приходящееся на один образец;  $F_0$  – первоначальная площадь поперечного сечения образца.

По значениям  $\sigma_s$  и  $\varepsilon$ , вычисленным для каждого этапа нагружения, строится экспериментальная кривая упрочнения  $\sigma_s = f(\varepsilon)$ , которую необходимо аппроксимировать выражением вида

$$\sigma_s = \sigma_{s\epsilon} \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_\epsilon} \right)^{\varepsilon_\epsilon}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_\epsilon$  – максимальная равномерная логарифмическая деформация;  $\sigma_{s\epsilon}$  – соответствующее ей истинное напряжение.

При испытании на сжатие максимальную равномерную деформацию определить невозможно, она определяется только при испытании на одноосное растяжение образца. Эта деформация реализуется в образце в момент образования шейки, и на диаграмме «усилие – абсолютное удлинение» эта точка соответствует максимуму усилия. Очевидно, что если построить диаграмму условных напряжений для растяжения  $\sigma = P/F_0$  в зависимости от деформации, то максимальное значение условного напряжения на этой диаграмме даст нам величину максимальной равномерной деформации. Из условия сохранения объема условное напряжение  $\sigma$  связано с истинным напряжением  $\sigma_s$  соотношением

$$\sigma = \sigma_s (1 - \psi). \quad (4)$$

Но так как согласно гипотезе единой кривой упрочнения зависимость истинного напряжения от деформаций для опытов растяжения и сжатия одинакова, то на основании экспериментальных данных по сжатию можно построить диаграмму условных напряжений для растяжения.

Таким образом, построив диаграмму  $\sigma = f(\psi)$  и найдя на ней точку максимума, отвечающую значениям  $\sigma_{\text{макс}}$ ,  $\psi_\epsilon$ , найдем

$$\sigma_{s\epsilon} = \frac{\sigma_{\text{макс}}}{1 - \psi_\epsilon}; \quad \varepsilon_\epsilon = \ln \frac{1}{1 - \psi_\epsilon}. \quad (5)$$

Подставляя найденные значения в формулу (3), можно построить аппроксимирующую кривую.

### 3. Объекты и средства исследования

3.1. Образцы цилиндрические – 4 шт., диаметром  $D_0=10$  мм, высотой  $h_0=18$  мм.

3.2. Испытательная машина модели ГМС-50.

3.3. Мерительный инструмент: штангенциркуль.

3.4. Ограничительные кольца высотой  $h_i = 26,0; 19,0; 15,85; 14,25; 11,25$  (мм).

### 4. Подготовка к работе

4.1. Изучить содержание настоящей работы.

4.2. Подготовить необходимый мерительный инструмент.

4.3. Ознакомиться с принципом измерения усилия и текущих размеров образца.

4.5. Изучить инструкцию по технике безопасности.

## 5. Программа работ

5.1. Измерить исходные образцы, результаты измерений занести в таблицу.

5.2. Осадить четыре образца одновременно до упора верхней плиты в ограничительное кольцо. Осадка производится сначала в кольце высотой 15,85 мм, затем в кольце 14,25 мм и, наконец, в кольце высотой 11,25 мм. Величины деформаций и истинного сопротивления определить по выражениям (1), (2) и занести в табл. 1.

Таблица 1 – Экспериментальные и расчетные данные

№ этапа	$h_0$ , мм	$h_i$ , мм	$F_0$ , мм <sup>2</sup>	$P$ , кН	$\varepsilon$	$\psi$	$\sigma$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{s \text{ экс}}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{s \text{ теор}}$ , Н/мм <sup>2</sup>
1	18	15,85							
2	18	14,25							
3	18	11,25							
4	36	19							
5	36	15,85							
6	36	14,25							
7	72	26							
8	72	19							

5.3. Осадить два составных образца, каждый из которых состоит из двух образцов, полученных на первом этапе, в кольцах высотой 19; 15,85; 14,25 мм.

5.4. Осадить один составной образец, состоящий из двух составных, полученных на предыдущем этапе, в кольцах высотой 26 и 19 мм. Расчеты произвести по вышеуказанным формулам и данные занести в табл. 1.

5.5. Построить экспериментальную кривую  $\sigma_s = f(\varepsilon)$ .

5.6. Построить вспомогательную кривую  $\sigma = f(\psi)$ , используя формулу (4). По этой кривой и формулам (5) найти значения  $\sigma_{s\theta}$ ,  $\varepsilon_\theta$  и построить теоретическую кривую по формуле (3).

## 6. Анализ полученных результатов

6.1. Сделать заключение о влиянии степени деформации на величину истинных напряжений, о характере согласования экспериментальной и теоретической кривых истинных напряжений.

## 7. Контрольные вопросы

7.1. Дать определение истинного и условного напряжений.

- 7.2. Сформулировать гипотезу единой кривой упрочнения.
- 7.3. С какой целью при осадке применяются составные образцы?
- 7.4. Что такое пластическая деформация?
- 7.5. Какие ограничения накладываются на соотношение размеров образца при осадке? Почему?
- 7.6. Как на основании экспериментальных данных по сжатию найти величину максимальной равномерной деформации для материала?

### **Библиографический список**

1. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1971. - 408 с.
2. Ренне И.П., Яковлев С.П. Построение кривых истинных напряжений из опыта сжатия составных цилиндрических образцов // Технология машиностроения. - Вып. 1, Тула, 1967. - С. 49-56.

## Лабораторная работа № 4

# ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЮ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ВЫШЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

### 1. Цель и задачи работы

**Цель работы** – установить влияние скорости деформации на сопротивление деформированию при горячей деформации.

**Задачи работы** – экспериментальная оценка влияния скорости деформации на сопротивление деформированию и определение величины показателя скоростного упрочнения.

### 2. Основные теоретические положения

Процессы ОМД, протекающие при температуре выше температуры рекристаллизации, принято называть горячими. Термомеханический режим технологических процессов горячей штамповки характеризуется температурой, скоростью и степенью деформации. Совокупное влияние этих факторов определяет сопротивление металла деформированию.

Известно, что при температуре выше температуры рекристаллизации основное влияние на упрочнение материала оказывает не степень, а скорость деформации.

Для учета упрочнения при расчетах процессов горячей ОМД была предложена аналитическая зависимость напряжения текучести от скорости деформации при заданной температуре и степени деформации следующего вида

$$\sigma_{s_2} = \sigma_{s_1} \left( \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} \right)^n, \quad (1)$$

где  $\sigma_{s_2}$  и  $\sigma_{s_1}$  – сопротивление материала деформированию при скоростях деформации  $\dot{\epsilon}_2$  и  $\dot{\epsilon}_1$ ;  $n$  – показатель скоростного упрочнения материала.

Показатель скоростного упрочнения материала  $n$  не является величиной постоянной, а зависит от температуры

$$n = n_0 \left( \frac{T}{T_{пл}} \right)^2, \quad (2)$$

где  $n_0$  – постоянная для данного металла величина;  $T$  – абсолютная температура обработки;  $T_{пл}$  – абсолютная температура плавления.

Зависимость (1) при известном значении  $n$  позволяет использовать экспериментальные данные о механических свойствах материала, полученные при статических испытаниях (скорость деформации  $\dot{\epsilon}_1$ ) для оценки сопротивления материала деформированию при динамических испытаниях (скорость деформации  $\dot{\epsilon}_2$ ).

Для экспериментального определения показателя скоростного упрочнения  $n$

проводят осадку цилиндрических образцов на гидравлическом прессе (статические испытания) и на копре (динамические испытания).

При осадке на копре значение средней скорости деформации  $\dot{\varepsilon}_2$  можно приблизительно определить как отношение средней скорости деформирования  $V_c$  к среднему значению высоты образца  $h_c$

$$\dot{\varepsilon}_2 = V_c / h_c. \quad (3)$$

Если принять, что скорость деформирования при осадке на копре изменяется от  $V_{\text{макс}}$  до 0 по параболическому закону, то средняя скорость деформирования может быть определена по формуле

$$V_c = \frac{2}{3} V_{\text{макс}}, \quad (4)$$

где  $V_{\text{макс}} = \sqrt{2gH}$ . Здесь  $H$  – высота свободного падения бойка.

Средняя высота деформированного образца определяется по формуле

$$h_c = \frac{h_0 + h_1}{2}, \quad (5)$$

где  $h_0$  и  $h_1$  – начальная и конечная высоты осаживаемого образца.

При осадке на гидравлическом прессе средняя скорость деформирования может быть определена через величину осадки  $\Delta h$  и время осадки  $\Delta t$

$$V_c = \Delta h / \Delta t = \frac{h_0 - h_1}{\Delta t}, \quad (6)$$

а скорость деформации при осадке на прессе будет

$$\dot{\varepsilon}_1 = V_c / h_c = \frac{2(h_0 - h_1)}{(h_0 + h_1)\Delta t}. \quad (7)$$

Так как полезная работа, затраченная на деформацию, пропорциональна среднему значению сопротивления деформированию, то при одинаковой степени деформации будет иметь место равенство

$$\frac{\sigma_{s_2}}{\sigma_{s_1}} = \frac{A_2}{A_1}, \quad (8)$$

где  $A_2$  и  $A_1$  – полезные работы деформации, затраченные на одну и ту же величину деформации, соответственно при осадке на копре и на гидравлическом прессе.

Полезная работа при осадке на копре может быть определена по выражению

$$A_2 = (0,9 \dots 0,95) \frac{Q_1 Q_2}{Q_1 + Q_2} H, \quad (9)$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  – вес бойка и наковальни соответственно;  $H$  – высота свободного падения бойка.

При осадке на гидравлическом прессе полезная работа определяется как площадь диаграммы «усилие-путь», записанной силоизмерительным устройством прессы или приближенно

$$A_1 = \frac{2}{3} P \Delta h. \quad (10)$$

Истинное сопротивление деформированию при осадке на гидравлическом прессе определяют по формуле

$$\sigma_{s1} = \frac{P}{F} = \frac{P h_1}{F_0 h_0}. \quad (11)$$

Проведя эксперименты и найдя значения  $\dot{\varepsilon}_1$ ,  $\dot{\varepsilon}_2$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ , определим величину истинного сопротивления деформированию при осадке на копре из формулы (8)

$$\sigma_{s2} = \frac{A_2}{A_1} \sigma_{s1}, \quad (12)$$

а также величину показателя скоростного упрочнения  $n$  и константы материала  $n_0$

$$n = \frac{\ln(A_2/A_1)}{\ln(\dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1)}; \quad n_0 = n \left( \frac{T_{nl}}{T} \right). \quad (13)$$

### 3. Объекты и средства исследования

3.1. Образцы цилиндрические из свинца – 2 шт., диаметром  $D_0=50$  мм, высотой  $h_0=60$  мм, изготовленные в идентичных условиях.

3.2. Копер, испытательная машина модели ГМС-50.

3.3. Мерительный инструмент: штангенциркуль.

### 4. Подготовка к работе

4.1. Изучить содержание настоящей работы.

4.2. Подготовить необходимый мерительный инструмент.

4.3. Ознакомиться с принципом измерения усилия и текущих размеров образца.

4.5. Изучить инструкцию по технике безопасности.

### 5. Программа работ

5.1. Измерить исходные образцы, результаты измерений занести в таблицу.

5.2. Один из двух образцов подвергается динамической осадке на специальном копре, а другой – статической осадке на испытательной машине усилием 500 кН. Для получения сопоставимых результатов статическая осадка на прессе производится на ту же величину  $\Delta h = h_0 - h_1$ , на какую производилась и динамическая осадка на копре. Влияние трения при осадке исключается геометрическими размерами образцов  $D_0/h_0 < 1$ .

5.3. По результатам экспериментов вычисляются  $\dot{\varepsilon}_1$ ,  $\dot{\varepsilon}_2$ ,  $A_1$  и  $A_2$ , на основании которых по формулам (11), (12) рассчитываются  $\sigma_{s1}$  и  $\sigma_{s2}$ , по формулам (13) –

$n$  и  $n_0$ .

5.4. Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 1.

Таблица 1 - Результаты измерений и вычислений

№ образца	Размеры образцов, мм				Температура образцов	Для копра		Для прессы	
	$h_0$	$h_1$	$\Delta h$	$D_0$	$T, K$	$H, м$	$\dot{\epsilon}_2, с^{-1}$	$t, с$	$\dot{\epsilon}_1, с^{-1}$
1									
2									

Продолжение табл. 1

Для копра			Для прессы	Температура плавления	Искомые значения			
$Q_1, Н$	$Q_2, Н$	$A_2, Дж$	$A_1, Дж$	$T_{пл}, К$	$n$	$n_0$	$\sigma_{s1}, Н/мм^2$	$\sigma_{s2}, Н/мм^2$

5.5. Вычисляется  $\sigma_{s2}$  по формуле (1).

## 6. Анализ полученных результатов

6.1. Сделать вывод о влиянии скорости деформации на сопротивление материала деформированию.

6.2. Сопоставить величины истинного сопротивления деформированию при осадке на копре, рассчитанные по формулам (12) и (1).

## 7. Контрольные вопросы

7.1. Что такое скорость деформирования?

7.2. Что такое скорость деформации?

7.3. Какое влияние оказывает скорость деформации на сопротивление материала деформированию при температуре горячей обработки?

7.4. С какой целью образцы осаживались на одну высоту на копре и на прессе?

7.5. Почему испытания проводятся на образцах, изготовленных из свинца?

## Библиографический список

1. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1977. - 408 с.
2. Шофман Л.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки. - М.: Машиностроение, 1964. - 367 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТКИ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ

#### 1. Цель и задачи работы

**Цель работы:** Ознакомление с методами анализа деформированного состояния процессов обработки металлов давлением с помощью делительной сетки при сложном нагружении.

#### 2. Основы теории

Основная задача анализа деформированного состояния установить величины главных деформаций (скоростей деформаций), определить направления главных осей, вычислить накопленную интенсивность деформаций в любой точке пластической области деформируемого тела в процессе пластического формоизменения.

Этот анализ, основан на наблюдении за изменением положения и длины двух базовых отрезков делительной сетки, нанесенной в главной плоскости, при ее перемещении в очаге деформации.

При исследовании процессов деформации с постоянной формой очага деформации (стационарных) достаточно зафиксировать искаженную сетку один раз.

При немонотонном формоизменении деформированное состояние может быть описано зависимостями компонент тензора деформаций, от некоторого параметра  $\lambda$ , определяющего процесс формоизменения. Интенсивности линейных и сдвиговых деформаций также являются функциями этого параметра:

$$e_i = e_i(\lambda), \quad \Gamma = \Gamma(\lambda). \quad (1)$$

Они могут быть найдены интегрированием по  $\lambda$  производной интенсивности линейной или производной интенсивности сдвиговой деформации

$$e'_i = \int_{\lambda} e'(\lambda) d\lambda; \quad \Gamma' = \int_{\lambda} \Gamma'(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где

$$e'_i = \sqrt{\frac{2}{3}(e'_x{}^2 + e'_y{}^2 + e'_z{}^2) + \frac{1}{3}\gamma'_{xy}{}^2}, \quad \Gamma' = e'_i \sqrt{3}, \quad (3)$$

Система координат  $(X, Y, Z)$  выбрана так, что оси  $X, Y$  лежат в главной плоскости деформаций.

Таким образом, при немонотонном формоизменении задача обработки результатов искажения делительной сетки сводится к нахождению производных от компонент деформации по параметру, определяющему процесс деформирования и интегрировании соотношения (2), с целью нахождения интенсивности деформаций.

При вычислении производных от компонент деформаций, наряду с неподвижной системой координат  $X_0, Y_0$ , удобно пользоваться подвижной системой координат  $(X, Y)$ , одна из осей которой связана с направлением одной из сторон ячей-

ки делительной сетки (рис. 1).

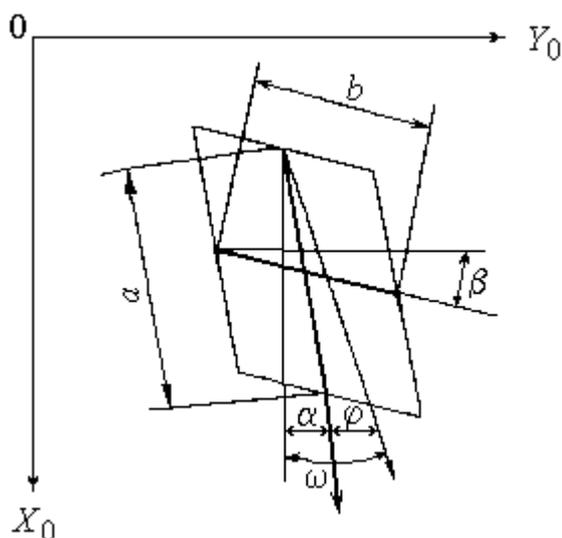


Рис. 1

Пусть с отрезком будет связана ось  $X$  подвижной системы координат. Непрерывное наблюдение за изменением положения и длин двух отрезков  $a$  и  $b$ , лежащих в главной плоскости, позволяет найти функциональные зависимости

$$\begin{aligned} a &= a(\lambda), \quad b = b(\lambda), \\ \alpha &= \alpha(\lambda), \quad \beta = \beta(\lambda). \end{aligned} \quad (4)$$

В случае стационарных процессов волочения, прессования и прокатки в качестве параметра удобно выбрать номер ячейки. Изменение длин отрезков и углов в процессе деформации могут быть представлены в виде графиков и таблиц.

Используя зависимости (4), компоненты девиатора производных деформаций по параметру могут быть вычислены в любой момент деформации по формулам

$$\begin{aligned} e'_x &= \frac{a'}{a}; \quad e'_y = \frac{b'}{b} - \gamma' \operatorname{tg} \gamma; \quad e'_z = -e'_x - e'_y \\ \gamma'_{xy} &= \gamma' - \left( \frac{a'}{a} - \frac{b'}{b} \right) \operatorname{tg} \gamma; \quad \gamma = \alpha + \beta. \end{aligned} \quad (5)$$

Текущие значения компонентов девиатора производных деформаций по параметру позволяет определить текущее значение производных интенсивности линейных и сдвиговых деформаций по формуле (3) и текущее положение главных осей относительно осей  $X$ ,  $Y$  определяемое углом  $\varphi$ ;

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{\gamma'_{xy}}{e'_x - e'_y}; \quad \varphi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left( \frac{\gamma'_{xy}}{e'_x - e'_y} \right). \quad (6)$$

Положение первой главной оси относительно неподвижной системы координат определяется углом

$$\omega = \varphi + \alpha. \quad (7)$$

Интегрированием по параметру могут быть найдены интенсивности деформаций. Полученная информация достаточна для оценки деформированного состояния в любой точке линий тока.

### 3. Объекты и средства исследования

Образец цилиндрический составной, материал свинец или алюминий. Прессование производится в конической матрице со степенью редукиции

$$\frac{F - f}{F} = 0,5,$$

где  $F$  - площадь заготовки;  $f$  - площадь прутка,

#### 4. Подготовка к работе

Перед началом работы в плоскости симметрии образца наносится делительная сетка с помощью универсального микроскопа УИМ-21 и головки прибора ПМТ-3. База делительной сетки 1,5мм.

### 5. Программа работы

5.1. Заготовка подвергается прессованию через коническую матрицу.

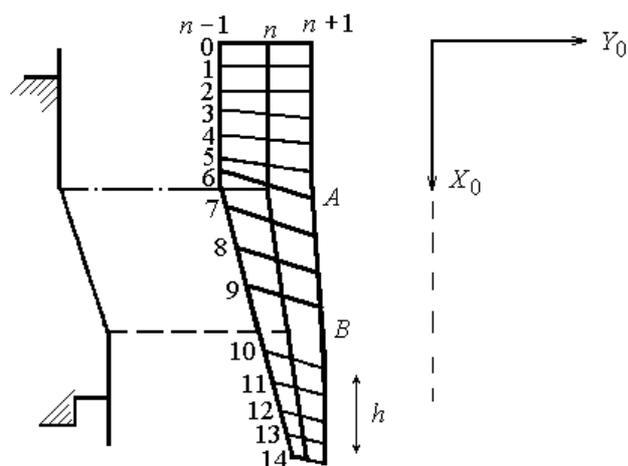


Рис. 2

5.2. На измерительном микроскопе УИМ-23 произвести измерение координат искаженной делительной сетки с точностью до 0,003 мм и заносятся в табл.1. Измерение делительной сетки ведется вдоль слоя в направлении прессования, начиная с ячейки вне очага деформации, которая не претерпела никаких изменений. При измерении в таблице фиксируются значения координат точек пересечения трех продольных рисок  $n-1$ ,  $n$ ,  $n+1$  с горизонтальными рисками  $k-1$ ,  $k$ ,  $k+1$  (рис. 2).

5.3. Вычисляются параметры делительной сетки. С целью упрощения вычислений за элементарную ячейку принимается ячейка с базой 3мм, которая делится в центре двумя ортогональными прямыми. На рис. 3 показана такая ячейка до деформации и в текущей стадии деформации, даны размеры, подлежащие определению.

Искомые размеры определяются по формулам

$$a_k = \sqrt{(X_{n,k+1} - X_{n,k-1})^2 + (Y_{n,k+1} - Y_{n,k-1})^2}; \quad (8)$$

$$b_k = \sqrt{(X_{k,n+1} - X_{k,n-1})^2 + (Y_{k,n+1} - Y_{k,n-1})^2}; \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_k = \frac{Y_{n,k+1} - Y_{n,k-1}}{X_{n,k+1} - X_{n,k-1}}; \quad \alpha_k = \operatorname{arctg} \frac{Y_{n,k+1} - Y_{n,k-1}}{X_{n,k+1} - X_{n,k-1}}; \quad (10)$$

$$\operatorname{tg} \beta_k = \frac{X_{k,n+1} - X_{k,n-1}}{Y_{k,n+1} - Y_{k,n-1}}; \quad \beta_k = \operatorname{arctg} \frac{X_{k,n+1} - X_{k,n-1}}{Y_{k,n+1} - Y_{k,n-1}}; \quad (11)$$

$$\gamma_k = \alpha_k + \beta_k. \quad (13)$$

Вычисленные значения заносятся в табл. 2.

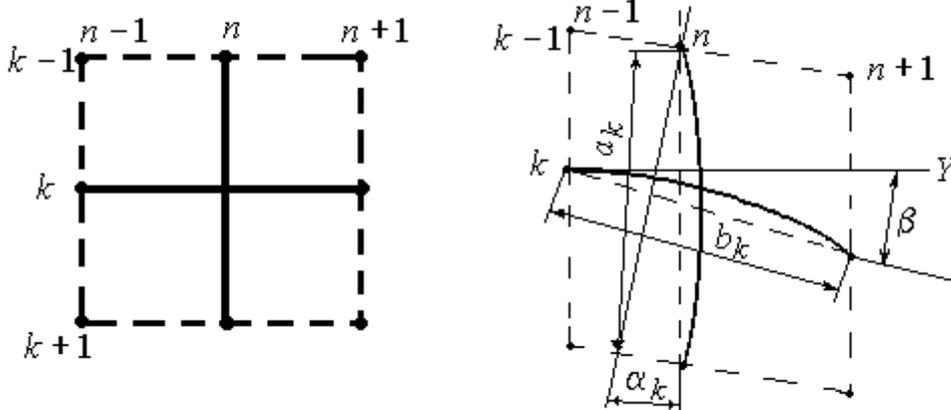


Рис. 3

5.4. Находятся производные от параметров ячейки  $a$ ,  $b$ ,  $\gamma$  разностным методом, например:

$$a'_k = \frac{a_{k+1} - a_{k-1}}{2}; \quad (13)$$

Найденные значения производных заносятся в табл. 2.

5.5. Определяются производные от компонентов деформаций по параметру  $e'_x$ ,  $e'_y$ ,  $e'_z$ ,  $\gamma'_{xy}$  с учетом формул (5).

5.6. Вычисляются величины производных по номеру ячейки от интенсивности деформаций в каждой точке вдоль линии тока по формуле (3).

5.7. Определяют величину накопленной интенсивности деформаций, используя для интегрирования приближенную формулу Симпсона:

$$e_i = \sum e'_i \Delta \lambda = \frac{1}{3} [e'_i + 4(e'_i)_1 + 2(e'_i)_2 + 4(e'_i)_3 + \dots + 4(e'_i)_{m-1} + (e'_i)_m]. \quad (14)$$

5.8. Находится направление главных осей в текущий момент деформации в каждой точке линии тока в соответствии с уравнениями (6) и (7).

5.9. Сравниваются результаты анализа деформированного состояния в предположении, что нагружение сложное с результатами анализа в предположении, что нагружение простое. Для условий простого нагружения положение главных осей и интенсивность деформаций определяется по формулам:

$$e_1 = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{a}{a_0} \right)^2 = \frac{1}{2} \ln \frac{a_1^2 + b_1^2 + \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4a_1^2 b_1^2 \cos^2 \gamma}}{2a_0^2}; \quad (15)$$

$$e_2 = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{b}{a_0} \right)^2 = \frac{1}{2} \ln \frac{a_1^2 + b_1^2 - \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4a_1^2 b_1^2 \cos^2 \gamma}}{2a_0^2}; \quad (16)$$

$$e_3 = -e_1 - e_2; \quad (17)$$

$$\Gamma = \sqrt{2(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2)}; \quad e_i = \frac{\Gamma}{\sqrt{3}}; \quad (18)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \operatorname{ctg}\gamma - \sqrt{\frac{1}{4} \operatorname{ctg}^2\gamma \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right)^2 - \frac{b^2}{a^2}}. \quad (19)$$

5.10. Представляются графические зависимости от параметра  $\lambda$  изменение угла  $\varphi$  или угла  $\omega$  и производной интенсивности деформаций.

## 6. Анализ полученных результатов

Сделать выводы о характере изменения локальной и суммарной интенсивности деформаций, вдоль линии тока и сопоставить результаты, полученные из анализа деформированного состоянием предположении, что нагружение простое или сложное.

## 7. Контрольные вопросы

1. Что такое стационарные процессы обработки металлов давлением?
2. Дать определение простого нагружения?
3. Почему делительная сетка наносится в главной плоскости деформаций?
4. Каким требованиям должны удовлетворять размеры делительной сетки?
5. Что такое условие несжимаемости?

## Библиографический список

1. Ренне И.П. Экспериментальные методы исследования пластического формоизменения в процессах обработки металлов давлением с помощью делительной сетки. – Тула: ТПИ, 1970. – 135 с.

Таблица 1 - Координат искаженной делительной сетки

Порядков. № ряда (гориз. риски)	Вертикальные риски					
	1-ый слой					
	$n-1$		$n$		$n+1$	
	$X$	$Y$	$X$	$Y$	$X$	$Y$
0.0	31,432	34,747	31,459	33,248	31,527	31,804
0	32,941	34,752	32,951	33,233	32,989	31,804
1	34,414	<b>34,764</b>	34,457	33,254	34,521	31,790
2	35,947	34,745	35,954	33,259	35,959	31,798
3	37,425	34,775	37,395	33,257	37,432	31,736
4	38,862	34,746	38,823	33,179	38,843	31,641
5	40,262	34,656	40,266	33,008	40,235	31,441
6	41,591	34,487	41,600	32,800	41,664	31,170
7	42,906	34,235	42,976	32,470	43,035	30,758
8	44,112	33,788	44,251	31,855	44,446	30,069
9	45,313	33,116	45,576	31,225	45,870	29,419
10	46,463	32,434	47,040	30,181	47,598	28,647
11	47,775	31,604	48,575	29,685	49,582	27,965
12	49,212	31,142	50,358	29,188	51,742	27,374
13	50,905	30,451	52,578	28,537	54,159	27,008
14	50,784	29,947	54,537	28,150	56,602	26,459
15	55,931	28,871	57,534	27,629	59,542	25,459
16	56,882	28,258	60,980	27,243	63,200	26,165
17	61,909	28,011	64,201	26,920	66,370	25,935
18	64,999	27,932	67,301	26,984	69,838	25,932
19	67,737	28,050	70,653	27,025	72,638	25,924
20	70,614	28,138	73,686	27,084	75,533	25,001
21	73,867	28,136	76,704	27,050	78,796	26,005
22	76,895	28,301	79,350	27,410	81,436	26,429

Порядков. № ряда гориз. (риски)	Вертикальные риски					
	2 – ой слой					
	$n - 1$		$n$		$n + 1$	
	$X$	$Y$	$X$	$Y$	$X$	$Y$
0,0	28,686	25,856	28,620	27,563	28,570	28,836
0	<b>30,140</b>	25,851	30,096	27,375	30,064	28,645
1	<b>31,671</b>	25,857	31,587	27,399	31,590	28,840
2	33,131	25,852	33,126	27,386	33,963	28,858
3	34,627	25,805	34,596	<b>27,381</b>	34,546	28,818
4	36,097	25,736	36,073	27,292	36,031	28,760
5	37,588	25,611	37,530	27,177	37,480	28,693
6	34,028	25,485	38,981	27,062	38,902	28,602
7	40,635	25,300	40,524	26,866	40,422	28,380
8	42,170	24,867	42,062	26,473	41,903	27,997
9	43,961	24,131	43,646	25,744	43,738	27,325
10	45,692	23,713	45,355	25,158	45,065	26,697
11	47,786	23,201	47,384	24,625	46,809	26,089
12	50,360	22,626	49,720	23,942	48,975	25,399
13	53,297	22,442	52,435	23,620	51,562	24,940
14	56,662	22,204	55,636	23,306	54,508	24,477
15	59,682	22,131	58,476	23,348	57,146	24,415
16	62,057	22,099	61,017	23,280	59,712	24,406
17	65,067	21,875	63,873	22,955	63,120	23,944
18	68,354	21,937	67,487	22,983	66,474	23,965
19	71,712	21,802	70,731	22,785	69,730	23,755
20	75,110	21,490	73,983	22,583	72,525	23,667
21	77,937	21,604	76,788	22,641	75,426	24,723
22	80,842	21,688	79,688	22,920	78,577	23,915

Таблица 2 – Результаты расчетов

Пор. № горизон- тальной риски	Параметры					Производ- ные			Производные от компонентов де- формации				Искомые величи- ны				
	$a$ , <i>мм</i>	$b$ , <i>мм</i>	$\alpha^0$	$\beta^0$	$\gamma^0$	$a'$	$b'$	$\gamma'$	$e'_x$	$e'_y$	$e'_z$	$\gamma'_{xy}$	$\varphi$	$\omega$	$\Gamma'_i$	$e'_i$	$e_i$
0																	
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	

**Разработали:** С.С. Яковлев, докт. техн. наук, профессор  
С.С. Ларин, канд. техн. наук, доцент  
В.И. Платонов, канд. техн. наук, доцент

Рассмотрено на заседании  
кафедры МПФ  
Протокол № \_\_\_\_\_  
от “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2012 г.

Нормоконтролер, ответственный  
по стандартизации на  
кафедре МПФ  
\_\_\_\_\_ О.М. Герасимова

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ С.С. Яковлев

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

**ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»**

**Механико-технологический факультет**

**Кафедра «Механика пластического формоизменения»**

**ОТЧЕТ**

**по лабораторным работам**

**«ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ»**

Выполнил(а)  
студент(ка) группы \_\_\_\_\_  
индекс группы

\_\_\_\_\_

подпись

\_\_\_\_\_

инициалы, фамилия

Проверил

\_\_\_\_\_

зачтено, незачтено

\_\_\_\_\_

подпись

\_\_\_\_\_

инициалы, фамилия

**Тула 20\_\_г**