

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тульский государственный университет»

Номер государственной регистрации НИР:
УДК 621.983; 539.374

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ТулГУ,
д.т.н., профессор

_____/М.В. Грязев/

М.П.

«26» ноября 2010 г.

ОТЧЕТ

о выполнении научно-исследовательской работы

Развитие теории пластического формообразования кристаллических ортотропных материалов с деформационной анизотропией механических свойств

Этап 1 (промежуточный)

Создание теории формообразования анизотропных кристаллических материалов при интенсивном пластическом деформировании и критериев локальной потери устойчивости и условия пластической потери устойчивости в виде гофрообразования листовых анизотропных кристаллических материалов при интенсивном пластическом деформировании

Государственный контракт № 14.740.11.0038 от 01 сентября 2010 г.

Шифр заявки «2010-1.1-211-078-019»

Руководитель проекта: _____ д.т.н., профессор Яковлев С.С.

г. Тула 2010 г.

Список исполнителей

Научный руководитель, д.т.н., профессор	_____	Яковлев С.С.
Исполнители	подпись, дата	
Проректор по НР д.т.н., профессор	_____	Кухарь В.Д.
профессор, д.ф-м.н., профессор	подпись, дата	
профессор, д.т.н., профессор	_____	Матченко Н.М.
профессор, д.т.н., профессор	подпись, дата	
профессор, д.т.н., профессор	_____	Чудин В.Н.
профессор, д.т.н., профессор	подпись, дата	
профессор, д.т.н., профессор	_____	Матченко И.Н.
профессор, д.т.н., профессор	подпись, дата	
профессор, д.т.н., доцент	_____	Панфилов Г.В.
докторант, к.т.н.	подпись, дата	
доцент, к.т.н., доцент	_____	Пасько А.Н.
докторант, к.т.н., доцент	подпись, дата	
докторант, к.т.н., доцент	_____	Поликарпов Е.Ю
доцент, к.т.н.	подпись, дата	
доцент, к.т.н.	_____	Коротков В.А.
доцент, к.т.н.	подпись, дата	
доцент, к.т.н.	_____	Черняев А.В.
ассистент, к.т.н.	подпись, дата	
доцент, к.т.н., доцент	_____	Ларин С.Н.
доцент, к.т.н.	подпись, дата	
доцент, к.т.н.	_____	Ремнев К.С.
доцент, к.т.н.	подпись, дата	
доцент, к.т.н.	_____	Ларина М.В.
доцент, к.т.н.	подпись, дата	
доцент, к.т.н.	_____	Платонов В.И.
ассистент, к.т.н.	подпись, дата	
доцент, к.т.н., доцент	_____	Агеева А.И.
доцент, к.т.н.	подпись, дата	
доцент, к.т.н.	_____	Киреева А.Е.
доцент, к.т.н.	подпись, дата	
доцент, к.т.н.	_____	Крылов Д.В.
доцент, к.т.н.	подпись, дата	
доцент, к.т.н.	_____	Яковлев Б.С.
доцент, к.т.н.	подпись, дата	
аспирант	_____	Ивутин А.Н.
	подпись, дата	
	_____	Пасынков А.А.

аспирант	_____	подпись, дата	Драбик А.Н.
аспирант	_____	подпись, дата	Брагин С.А.
аспирант	_____	подпись, дата	Полухин Д.С.
аспирант	_____	подпись, дата	Бессмертный А.В.
аспирант	_____	подпись, дата	Перепелкин А.А.
аспирант	_____	подпись, дата	Бессмертная Ю.В.
аспирант	_____	подпись, дата	Легейда В.Ю.
студент	_____	подпись, дата	Леонова Е.В.
студент	_____	подпись, дата	Дериева А.Н.
студент	_____	подпись, дата	Наумова И.А.
студент	_____	подпись, дата	Золотухин М.Ю.
инженер	_____	подпись, дата	Миронова О.А.
ст. лаборант	_____	подпись, дата	Тимофеева М.В.
Нормоконтролер	_____	подпись, дата	Герасимова О.М.

Реферат

Отчет 206 с., 1 ч., 10 рис., 198 источников, 1 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: Выполнен аналитический обзор современного состояния теории и технологии пластического деформирования кристаллических анизотропных материалов. Выполнен выбор и обоснование оптимального варианта направления исследований. Разработан план проведения экспериментальных и теоретических исследований. Разработан вариант теории пластичности кристаллических ортотропных материалов с анизотропным упрочнением, который основан на неоднородном расширении поверхности нагружения в шестимерном пространстве напряжений, связанных с направлениями главных осей анизотропии. В качестве параметров упрочнения используются величина интенсивности деформации и компоненты тензора деформаций в главных осях анизотропии. Сформулирован энергетический и деформационный критерии деформируемости ортотропноупрочняющегося материала в процессах обработки давлением листового материала, которые учитывают кроме влияния относительной величины среднего напряжения, параметра вида напряженного состояния, а также и ориентацию первой главной оси напряжения относительно главных осей анизотропии, а также ускорение процесса накопления повреждаемости под влиянием уже накопленных в материале повреждений. Предложены критерии шейкообразования ортотропноупрочняющегося материала при двухосном растяжении листовой заготовки, полученные из условия положительности добавочных нагрузок и положительности работы добавочных нагрузок. Сформулирован критерий потери устойчивости трубной

заготовки из кристаллических ортотропных материалов на основе статического критерия устойчивости. Выполнен анализ потери устойчивости трубной заготовки из кристаллических ортотропных материалов. Установлено влияние технологических параметров, нормальной и цилиндрической анизотропии механических свойств исходной трубной заготовки на устойчивость к образованию складок. Разработано условие пластической потери устойчивости в виде гофрообразования (волнистости) прямоугольной пластины из кристаллических ортотропных материалов в условиях плоского напряженного состояния на основе энергетического метода исследований.

По результатам научных исследований опубликованы три монографии, опубликованы и подготовлены к опубликованию 38 научных работ в ведущих научных журналах, рекомендуемых ВАК Российской Федерации; 23 статей в межвузовских сборниках научных трудов, а также опубликовано 11 тезисов докладов в сборниках трудов международных и Всероссийских научно-технических конференций. Проведены патентные исследования. Получен патент на изобретение: Пат. 2392079 Российская Федерация, МПК⁷ В 21 D 22/02. «Способ штамповки тонкостенных полусферических днищ и устройство для его осуществления». Подана заявка на изобретение.

По результатам научно-исследовательской работы защищена одна докторская диссертационная работа и две кандидатские диссертационные работы по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением, подготовлена к защите одна докторская диссертационная работа 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 150400 «Технологические машины и оборудование» и студентов, обучающихся по направлению 150200 «Машиностроительные технологии и оборудование» специальности 150201 «Машины и технология обработки металлов давлением», 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 при разработке дополнительного раздела «Теоретические основы экспериментальных исследований пластического формоизменения» курса «Теория обработки металлов давлением» в виде новых лекций, 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 8 Диплом лауреатов Всероссийской 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, 2010 г.). Исполнителями НИР опубликованы 4 научно-методические статьи.

По результатам научных исследований опубликованы два учебных пособия с грифом УМО вузов по политехническому и университетскому образованию.

Члены творческого коллектива удостоены звания лауреата премия имени С.И. Мосина 2010 года в области разработок военной техники, технологии и оборудования, имеющих двойное применение (д.т.н., проф. Яковлев С.С., д.т.н., проф. Трегубов В.И.). Доктору технических наук, профессору Яковлеву С.П. посмертно присвоено Почетное звание «Основатель научной школы» Российской академии естествознания.

Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели.

Теоретическое значение результатов работы состоит в развитии теории деформирования листовых заготовок из кристаллических ортотропных материалов с анизотропным упрочнением, в создании энергетического и деформационного критериев деформируемости ортотропных анизотропно-упрочняющихся материалов в процессах обработки давлением листовых материалов, в формулировке критериев шейкообразования ортотропного анизотропно-упрочняющихся материалов при двухосном растяжении листовых заготовок, в создании критерия потери устойчивости трубной заготовки из кристаллических ортотропных материалов, в разработке условия пластической потери устойчивости в виде гофрообразования прямоугольных пластин из кристаллических ортотропных материалов в условиях плоского напряженного состояния. 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 будут 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 позволят повысить удельную прочность деталей на 20...30 %; снизить массу деталей и узлов на 20...25 %; увеличить коэффициент 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 «ТЕХНОМАШ» (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. Рязань 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 в учебном процессе в курсах «Новые технологические процессы и оборудование» и «Механика процессов пластического формоизменения», «Теория обработки металлов давлением», «Производство технологического оборудования», «Горячая штамповка», «Новые виды горячей и холодной объемной штамповки», «Нагрев и нагревательные устройства» для бакалавров техники и технологии направления 150400 «Технологические машины и оборудование» 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.

Содержание

Введение	10
1. Аналитический обзор современного состояния теории и технологии пластического деформирования кристаллических анизотропных материалов	12
1.1 Анализ существующих технологий изготовления полусферических и полуторовых тонкостенных днищ	12
1.2 Теоретические и экспериментальные исследования процессов глубокой вытяжки осесимметричных деталей.....	15
1.3 Теоретические и экспериментальные исследования процессов холодного выдавливания.....	19
1.4 Анизотропия материала заготовок и ее влияние на процессы пластического деформирования	26
2. Выбор и обоснование оптимального варианта направления исследований	34
3. План проведения экспериментальных и теоретических исследований	38
4. Основные уравнения и соотношения для теоретического анализа операций пластического формообразования кристаллических анизотропных листовых заготовок	41
4.1. Условие текучести и ассоциированный закон пластического течения ортотропного материала.....	41
4.2. Плоское напряженное состояние анизотропного материала.....	43
4.3. Плоское деформированное состояние анизотропного тела.....	45
4.4. Математические модели упрочнения кристаллического анизотропного материала.....	47
4.5. Феноменологические модели разрушения кристаллических анизотропных материалов по накоплению повреждаемости материала.....	50
4.5.1. Основные предположения и формулировка критериев разрушения.....	51
4.5.2. Учет повреждаемости при исследовании пластического формоизменения.....	56
4.6. Критерии локальной потери устойчивости кристаллических ортотропных анизотропно упрочняющихся материалов.....	57
4.6.1. Критерий локальной потери устойчивости кристаллических ортотропных анизотропно упрочняющихся материалов для плоского напряженного состояния заготовки.....	59
4.6.2. Критерий локальной потери устойчивости кристаллических ортотропных анизотропно упрочняющихся материалов для плоского напряженного и плоского деформированного состояний заготовки.....	62
5. Устойчивость трубной заготовки из кристаллического анизотропного материала в пластической области в виде образования складок	65

5.1.	Основные соотношения и предположения.....	65
5.2.	Условие устойчивости цилиндрической заготовки.....	68
5.3.	Обсуждение результатов расчетов.....	71
6.	Условие пластической потери устойчивости в виде горообразования (волнистости) прямоугольной пластины из кристаллического анизотропного материала в условиях плоского напряженного состояния.....	76
6.1.	Условие пластичности кристаллического анизотропного материала.....	77
6.2.	Схема выпучивания элемента листа.....	84
6.3.	Работа внутренних сил при выпучивании анизотропной пластины (потенциальная энергия деформации изгиба и кручения).....	85
6.4.	Работа внешних сил на контуре элемента пластинки (изменение потенциальной энергии деформации срединной плоскости пластины при выпучивании).....	92
7.	Использование результатов научно-исследовательской работы в учебном процессе.....	100
8.	Сведения о выполнении целевых индикаторов и показателей федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы».....	102
8.1.	Список монографий, опубликованных в 2010 г.....	102
8.2.	Список учебных пособий с грифом УМО, опубликованных в 2010 г....	102
8.3.	Список научно-методических статей, опубликованных в 2010	103
8.4.	Список статей, опубликованных в ведущих научных журналах в 2010 г.....	103
8.5.	Список статей, опубликованных в межвузовских сборниках научных трудов в 2010 г.....	108
8.6.	Список тезисов докладов, опубликованных в 2010 г.....	110
8.7.	Список, поданных заявок на изобретение в 2010 г.....	112
8.8.	Список, полученных патентов в 2010 г.....	112
8.9.	Список защит кандидатских диссертаций в 2010 г.....	112
8.10.	Список защит докторских диссертаций в 2010 г.....	113
8.11.	Признание заслуг коллектива.....	113
	Заключение.....	115
	Список используемых источников.....	122
	Приложение 1. Дополнительный раздел «Теоретические основы экспериментальных исследований пластического формоизменения» в курс «Теория обработки металлов давлением» в виде новых лекций.....	141

Введение

Общей проблемой машиностроения является повышение эффективности технологических процессов производства с обеспечением высоких эксплуатационных характеристик изделий. Это актуально для ракетно-космической техники, двигателестроения и других отраслей: авиационной, транспортной, оборонной и т.д.

Типовыми конструкциями изделий этих производств являются корпусные оболочки из листовых и трубных заготовок (обшивки отсеков, обтекатели, топливные баки различных форм и размеров, баллоны хранения газов, сложные системы трубопроводов и арматуры, сопловые оболочки и оболочки камер сгорания двигателей и др.). Эти конструкции требуют применения высокопрочных материалов, трудоемки в обработке. Используются специальные стали, титановые и высокопрочные алюминиевые сплавы, композиционные материалы и др.

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: прессового, сварочного, оборудования для электроэрозионной и механической обработки, сборочных ступеней и др.

Методы технологической обработки на базе резания, сварки, соединения клепкой, сваркой, пайкой не всегда обеспечивают требуемый уровень качества. Качество определяется удельной прочностью изделий, точностью геометрии форм, герметичностью, коррозионной стойкостью, уровнем повреждаемости материала на стадиях обработки. При этом не маловажен расход основных материалов и трудоемкость производства.

Прокат, используемый для процессов холодного и изотермического деформирования, как правило, обладает анизотропией механических свойств, которая зависит от физико-химического состава сплава, технологии его получения и температуры обработки. Анизотропия механических свойств заготовки проявляется как при пластическом деформировании, так и при деформировании в режиме кратковременной ползучести и оказывает существенное влияние на силовые, деформационные

параметры процессов обработки металлов давлением, на качество получаемых изделий.

Технологические режимы обработки определяют возможности формообразования, влияют на устойчивость деформаций, развитие несплошности материала и возможное разрушение. Они формируют качество изделий, что связано с анизотропией, упрочнением, вязкостью обрабатываемых материалов.

Решение этой народнохозяйственной проблемы может быть достигнуто путем максимального использования внутренних резервов деформирования материала созданием научно обоснованных наукоемких технологических процессов штамповки, учитывающих анизотропию механических свойств, упрочнение материала заготовки, термомеханические режимы формоизменения и другие особенности процессов обработки металлов давлением. В этой связи научное обоснование режимов технологических процессов формоизменения анизотропных листовых кристаллических заготовок является весьма актуальной проблемой.

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. Аналитический обзор современного состояния теории и технологии пластического деформирования кристаллических анизотропных материалов

1.1 Анализ существующих технологий изготовления полусферических и полуторовых тонкостенных днищ

В условиях современного научно-технического прогресса интенсивно развиваются машиностроение, судостроительная, ракетно-космическая, авиационная промышленности, увеличивается производство, растет номенклатура самых разнообразных изделий, конструкции которых содержат множество емкостей: резервуаров, автоклавов, цистерн, баков, баллонов, работающих при значительных внутренних и внешних давлениях, в активных химических средах, а также применяемых для длительного хранения и перевозки различных материалов [53, 69, 77].

Значительное место среди деталей указанных конструкций занимают тонкостенные днища двойной кривизны, сферообразной, эллиптической и куполообразной форм, изготавливаемые из листовых материалов.

Эффективность изделий ракетно-космической техники, стоимость доставляемого на орбиту полезного груза, массовое совершенствование транспортно-космических систем и удельная прочность конструкционных материалов, из которых изготавливаются эти системы, связаны взаимосвязаны. Поэтому борьба за повышение удельной прочности является одним из основных направлений работ по материалам, используемым в области как ракетно-космической, так авиационной техники. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в последние годы в области применения неметаллических и композиционных материалов, металлические сплавы и по сей день являются основными материалами для силовых узлов и конструкций изделий ракетно-космической техники. Среди этих материалов все больший удельный объем занимают титановые и специальные алюминиевые сплавы. Техническое и экономическое использование сплавов оправдано в тех случаях, когда прочность является решающим фактором [2, 4, 77].

Высокие эксплуатационные и прочностные качества днищ обуславливают широкое их применение в изделиях. Общеизвестны также преимущества конструкций со сферическими элементами: высокая прочность и жесткость при незначительной массе; наименьшая поверхность при одном и том же объеме емкости и др. [77].

В связи с общей тенденцией к увеличению плотности компоновки узлов современных машин, снижению их материалоемкости, увеличению прочности повышаются требования к точности и конструктивной прочности деталей типа днищ, прочности при неизменной массе; ужесточаются допуски на геометрические размеры, величину и неравномерность утонения днищ при их изготовлении.

Существует много способов изготовления деталей типа днищ. Это связано с различным функциональным назначением деталей, повышенными требованиями к их точности и разнообразием применяемых листовых конструкционных материалов. В настоящее время значительную часть днищ в промышленности изготавливают способами холодной штамповки на прессах: формовкой, вытяжкой, обжимом [53, 77]. Это объясняется высокой производительностью способов холодной штамповки днищ на прессах, наличием значительного парка прессового оборудования, а также высоким качеством деталей.

Для изготовления тонкостенных полуторов обычно используют реверсивный метод штамповки [77]. Он применяется с целью увеличения растягивающих и уменьшения сжимающих напряжений. Реверсивная вытяжка является высокопроизводительным процессом, обеспечивающим получение изделий с высоким качеством поверхности.

Обычно холодноштамповочные детали из листовых материалов группируют по общности конструктивных, конструкторско-геометрических признаков, технологических и конструктивно-технологических признаков, точностных требований и т.д.

Классификация деталей по конструктивно-геометрическим признакам позволяет наиболее полно определить технологические задачи по совершенствованию существующих и разработке принципиально новых способов получения деталей из листовых материалов [77].

Классификация деталей по различным технологическим признакам обеспечивает возможность сгруппировать детали по общности применяемого технологического процесса, зависящего от уровня развития общественного производства.

Исходя из принципиальной структурной схемы классификации деталей по конструктивно-геометрическим признакам, в основу которой положено допущение о том, что любая листоштамповочная деталь может быть представлена одним из конструктивных элементов типа «стакан» или «борт» или их сочетания, предложена принципиальная структурная схема классификации деталей типа днищ.

К числу наиболее перспективных и принципиально новых технологических процессов, направленных на совершенствование современного производства, относится медленное горячее формоизменение листовых заготовок избыточным давлением газа (изотермическая пневмоформовка). Технологические принципы формоизменения листовых заготовок изотермической пневмоформовкой могут быть применены в производстве полусферических тонкостенных днищ из высокопрочных алюминиевых и титановых сплавов [53]. Каждый из названных способов имеет свои преимущества и недостатки. Выбор того или иного способа получения полусферических и полуторовых тонкостенных днищ зависит от наличия соответствующего типа прессового специального и вспомогательного оборудования, поставок металла, его характеристик, производственного и технического опыта.

На ЗАО «ЗЭМ РКК «Энергия» им. С.П. Королева» был разработан и внедрен принципиально новый технологический процесс штамповки-вытяжки тонколистовых (1...4 мм) осесимметричных деталей типа днищ с применением метода ступенчатого набора металла, осуществляемого в универсальных сборных переналаживаемых штампах (УСПШ) с последующей окончательной прессовой формовкой или калибровкой взрывом.

Сущность метода ступенчатого набора состоит в следующем: для устранения утонения стенок применяется предварительный набор металла, осуществляемый в штампах, выполняемых с обязательным обеспечением степеней вытяжки (коэффициента вытяжки), свойственных штампуемому металлу; устранение радиального гофрообразования осуществляется путем применения каскада цилиндрических сту-

пений набора металла, по геометрии близкого к контуру вписанного радиуса днища; в предварительных операциях набор металла осуществляется не полностью (для сферических днищ – около 95 %, для торовых – 90 % расчетной заготовки). Недостающее количество металла в наборе восполняется в процессе окончательной вытяжки дотяжкой из фланца [106, 107, 111, 114].

1.2. Теоретические и экспериментальные исследования процессов глубокой вытяжки осесимметричных деталей

На данном этапе развития техники и технологии при изготовлении осесимметричных изделий широкое распространение нашли методы глубокой вытяжки.

Широкий спектр работ отечественных и зарубежных авторов посвящен исследованию процессов глубокой вытяжки, изучению предельных возможностей формоизменения, силовых режимов; это работы С.И. Губкина, Е.А. Попова, И.А. Норицына, Л.А. Шофмана, Г. Закса и других [1, 3, 8, 13, 14, 20, 22, 25, 32, 33, 36, 48, 49, 51, 55, 59, 60, 61, 67, 70, 73, 77, 82, 83, 84, 86, 126, 127, 128, 133, 141, 147, 151, 152, 158, 159, 161, 162, 168, 169-172, 173, 175, 191, 193-198]. В этих работах большое внимание уделено влиянию технологических параметров на предельные возможности формоизменения и силу вытяжки. Теоретические исследования выполнены путем совместного решения приближенных уравнений равновесия и условий пластичности.

Вытяжка без прижима в конических и радиальных матрицах имеет преимущества перед вытяжкой с прижимом. Использование прижима обусловлено тем, что тангенциальные сжимающие напряжения достигают максимума на кромке заготовки, что, в свою очередь, вызывает недостаточную устойчивость фланца заготовки против складкообразования [126, 127].

Авторами работ [9, 25, 134, 135] предложены критерии локальной потери устойчивости плоской заготовки в процессе пластической деформации. Однако приведенные зависимости достаточно громоздки. Границы применения первой и последующих операций вытяжки без прижима авторами работ [14, 127, 128] устанавли-

вают экспериментально. Эмпирический критерий, определяющий возможность вытяжки без складкодержателя, который нашел широкое применение при разработке технологических процессов в промышленности, предложен Л.А. Шофманом [172].

Теоретическим исследованиям процессов вытяжки осесимметричных нецилиндрических деталей (вытяжки деталей с широким фланцем, вытяжки ступенчатых деталей, вытяжки конических деталей, вытяжки сферических деталей и т.д.) посвящены работы [77, 126, 127].

Влияние изменения толщины заготовки в процессе вытяжки для изотропного и анизотропного материала на напряженное и деформированное состояние заготовки рассмотрено в работах [12, 32, 168, 173, 175]. Показано, что при степенях деформации меньше 50 % это влияние незначительно (не более 10 %). Более подробные экспериментальные и теоретические исследования силовых параметров и предельных степеней первой и последующих операций вытяжки изотропного материала на конических и радиальных матрицах проведены в работах [70, 126, 127]. Также приведены методики учета упрочнения материала, изменения толщины заготовки в процессе деформирования, влияния сил трения на поле напряжений. Выявлены оптимальные условия протекания операции вытяжки.

Целый ряд работ [26-31, 69, 77] посвящен теоретическим и экспериментальным исследованиям процесса реверсивной вытяжки осесимметричных деталей. Реверсивная вытяжка является высокопроизводительным процессом, обеспечивающим получение изделий с высоким качеством поверхности. Несмотря на широкое применение этого способа, теория его разработана слабо.

Реверсивная вытяжка представляет собой в большинстве случаев соединение двух операций вытяжки, выполняемых за один рабочий ход пресса, причем вторая вытяжка происходит в направлении, обратном первой, и сопровождается выворачиванием заготовки. При этом можно получить более высокую степень деформации. Этот способ применяется главным образом для вытяжки крупных или средних размеров при относительной толщине заготовки $(s_0 / D_0) 100 > 0,25$; для объединения двух операций вытяжки в одну, т.е. для получения первой вытяжки большей глубины, чем это достижимо при нормальной вытяжке; для подготовки к вытяжке сту-

пенчатого полого колпачка и при изготовлении тонкостенных деталей сферической и параболической форм, когда требуется создание большого радиального натяга материала. За одну операцию можно получить деталь высотой $h \approx 0,25d$. Как правило, реверсивную вытяжку производят на тихоходных кривошипных прессах или, еще лучше, особенно для получения первой вытяжки увеличенной высоты, на гидравлических прессах. Изменение толщины материала по высоте вытяжки достигает в опасных сечениях -10% , а у края детали $+30\%$.

Реверсивную вытяжку деталей средних размеров иногда производят одновременно с вырубкой кружка, для чего в конструкцию штампа вводится вырубная матрица, устанавливаемая над вытяжкой. В ряде случаев реверсивная вытяжка применяется и для одной последующей операции вытяжки с целью увеличения растягивающих и уменьшения сжимающих напряжений. Это наиболее целесообразно при вытяжке деталей со сферическим и коническим дном, а также деталей параболической или криволинейной формы. Реверсивная вытяжка применяется также для изготовления крупногабаритных полуторовых деталей.

Для изготовления цилиндрических деталей, толщина стенки которых меньше толщины дна, как правило, применяется процесс вытяжки с утонением стенки. Дополнительным фактором в пользу этой операции является упрочнение материала и, как следствие, высокие прочностные характеристики детали.

Ряд работ посвящен теоретическим исследованиям вытяжки с утонением стенки [70, 126, 127, 130, 131]. В этих работах с помощью инженерного метода, метода баланса работ и метода характеристик исследовалось влияние технологических параметров на предельные возможности формоизменения и силовые режимы процесса.

Методика расчета технологических параметров процесса вытяжки с утонением стенки через несколько матриц с целью сокращения числа операций, уменьшения разностенности деталей, уменьшения искривления оси описана в работах [130, 131].

Для получения глубоких цилиндрических изделий с переменной толщиной стенки по высоте применяются конические пуансоны. Этому вопросу посвящены работы [22, 67, 130, 131]. Установлено, при осуществлении этой операции кониче-

ским пуансоном увеличиваются возможности деформирования, уменьшаются силы вытяжки и съема готового изделия по сравнению с вытяжкой цилиндрическим пуансоном. На операциях вытяжки с утонением стенки обычно используются матрицы с углами конусности $\alpha = 5...20^\circ$.

Результаты экспериментальных исследований силовых параметров и предельных степеней утонения приведены в работах [130, 131].

Теоретические и экспериментальные основы прогнозирования вероятности возникновения технологического брака изложены в работе [37]. Приведены рекомендации по проектированию технологических операций, управляемых по потере устойчивости и разрушению в процессе штамповки, а также повышению точности, качества и надежности спроектированных технологических процессов. Отмечено, что штамповка тонколистовых заготовок осуществляется практически на предельных режимах, поэтому возможность технологических отказов по тем или иным видам брака весьма велика. В связи с этим становится актуальным совершенствование теории листовой штамповки в направлении более точного учета основных факторов, влияющих на процесс, и более надежного прогнозирования возможных технологических отказов.

Ряд работ [14, 175] посвящен теоретическому и экспериментальному изучению силовых режимов, предельных степеней деформации, удельных сил, действующих на вытяжной инструмент, качества получаемых изделий при комбинированной вытяжке в матрицах различного профиля (радиального, конусного, трактрисного) цилиндрическим и коническим пуансоном изотропных и анизотропных материалов. Даны рекомендации по профилю геометрии матрицы, предложены новые способы вытяжки и испытания листового материала на способность к комбинированной вытяжке. Эти исследования позволили получить простые соотношения для расчета силы процесса и определения предельных степеней деформации.

1.3. Теоретические и экспериментальные исследования процессов ХОЛОДНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

Процессы холодного выдавливания относятся к прогрессивным методам обработки металлов давлением и позволяют значительно сократить расход материалов, повысить качество и эксплуатационные свойства изделий, достичь высокой производительности труда за счет использования быстроходных прессов.

Номенклатура изделий, полученных выдавливанием, может быть разнообразной: от сплошных деталей типа стержней, валов, осей с различными фланцами до полых деталей типа втулки, стакана, ступенчатой трубы и т.д.

В качестве исходных заготовок в технологических процессах холодного выдавливания применяются прокат, труба, лист или лента, проволока, слитки.

Процессы холодного выдавливания характеризуются высокими удельными силами при значительных степенях деформации и их большой неоднородности в очаге деформации. Эти особенности являются в основном сдерживающими факторами, требующими грамотного подхода при проектировании технологических переходов, связанных с процессами холодного выдавливания. От них зависят значения степени деформации, стойкость инструмента, качество изделий, себестоимость продукции и рентабельность производства.

Процессы холодного выдавливания, являясь в настоящее время прогрессивным методом ОМД, нашли широкое применение не только в машиностроительной области, но и в научной сфере в качестве универсального средства экспериментальной проверки многих теоретических гипотез.

Большой вклад в развитие и популяризацию теории и технологии холодного выдавливания внесли русские учёные Ю.А. Алюшин, А.А. Богатов, В.А. Головин, О.А. Ганаго, С.И. Губкин, А.М. Дмитриев, А.К. Евдокимов, В.А. Евстратов, В.Л. Колмогоров, В.А. Мишунин, А.Г. Овчинников, И.П. Ренне, Е.И. Семенов, Л.Г. Степанский, И.Я. Тарновский, А.Д. Томленов, Л.А. Шофман, С.П. Яковлев и др., а так-

же иностранные учёные Б. Авицур, Р. Гайтер, У. Джонсон, Х. Кудо, М. Куноги, Г.Д. Фельдман, Дж. Эверхарт и др. [38-44, 47, 74, 85, 87, 128, 146, 150, 151, 155, 175].

Многие технологические задачи, связанные с исследованием напряжённо-деформированного состояния, успешно анализируются способами и, которые базируются на математических методах решения краевых задач. Для учёта максимального количества значащих факторов такие задачи могут быть либо неоправданно сложными и трудоёмкими, либо упрощёнными, зачастую ограниченными простыми геометрическими формами тел и схемами нагружения. Многие практически важные задачи не могут быть решены аналитически вследствие сложности конструкции и граничных условий.

Родоначальником научного изучения процесса прессования, по-видимому, был Треска, опубликовавший в 1864 г. предварительные итоги экспериментов по штамповке и выдавливанию. Первые систематические исследования по этому предмету были выполнены Эибелем и Фангмейером, Эйсбейном и Заксом в 1931 г. Их работы имели большое значение и постоянно используются в настоящее время.

Анализ процесса выдавливания был основан на так называемой общедоформационной теории до появления в 1946 г. работы Хилла, использовавшего теорию линий скольжения.

Поскольку методика полей линий скольжения является чрезвычайно эффективной для понимания процесса прессования (особенно учитывая его теоретически негетогенную природу) Грин и в особенности Джонсон применили ее к решению различных плоских задач.

В работе [38] представлена теория процессов выдавливания металлов на основе современных методов прикладной теории пластичности. Значительное место занимает рассмотрение теории плоского выдавливания с использованием метода линий скольжения, который в настоящее время все более широко применяется для описания процессов плоской деформации. На основе этого метода рассматривается большое количество задач прямого и обратного выдавливания, выдавливания в несимметрично расположенные матрицы, бокового выдавливания, прошивки и др. Ра-

бота содержит также обширный экспериментальный материал, полученный как авторами, так и другими исследователями.

Весьма перспективным представляется развитый авторами так называемый метод верхних оценок, который основан на хорошо известных экстремальных принципах математической теории пластичности, достаточно прост и позволяет с минимальными затратами труда определять энергосиловые параметры процессов выдавливания и других аналогичных процессов обработки давлением. Для тех задач, у которых имеется точное решение, этот метод при расчете силы дает ошибку, не превышавшую 15...20 % даже при самых грубых кинематических возможных полях скоростей. Показана возможность применения этого метода к задачам с осевой симметрией. Рассмотрена возможность применения результатов теории плоского выдавливания к процессам осесимметричного выдавливания.

Теория пластичности при существующем уровне развития может объяснить только ограниченную область явлений, наблюдаемых при выдавливании. Именно поэтому требуется принятие некоторых идеализирующих допущений даже при анализе сравнительно простых задач.

Методика полуэмпирического анализа, основанная на измерении распределения деформаций, развитая Томсенем, Фришем и др., послужила пониманию усложненных задач. Некоторые из последних достижений в этой области рассмотрены Бишопом.

В работе [59] приведены сведения об основных операциях холодной объемной штамповки; конструировании штамповой оснастки и выборе отдельных типоразмеров оборудования и автоматических линий. Описаны свойства и особенности подготовки металла при штамповке деталей на прессах и автоматах. Изложены данные по холодной и полугорячей штамповке заготовок из углеродистых и легированных сталей, а также цветных сплавов, требования к качеству готовых деталей, технико-экономические показатели. Приведены расчетные формулы и графики для определения давлений на инструмент и деформирующих сил при различных формообразующих операциях. Даны понятия об автоматизации проектирования процессов холодной объемной штамповки.

Изготовление поковок штамповкой выдавливанием позволяет в некоторых случаях полностью исключить последующую обработку резанием и улучшить механические характеристики прочности и пластичности. В работе [66] изложена методика анализа кинематического и напряженного состояния заготовки в процессе ее выдавливания. Даны рекомендации по методике проектирования технологических процессов штамповки выдавливанием. Рассмотрены конструкции штампов и конструктивные схемы специального оборудования.

В работах [40-44, 74] рассмотрены новые технологические процессы холодного выдавливания деталей с гладкими и ступенчатыми полостями, позволяющие сократить затраты на последующую обработку продукции. В этих процессах повышение степени формоизменения за один переход обеспечивается активными силами трения.

В настоящее время известно значительное количество экспериментальных работ в области прессования. В большинстве из них, однако, не принимаются во внимание последние достижения теории.

В работе [47] представлены сортамент ребристых панелей, профилей и труб переменного сечения, полых профилей из алюминиевых и титановых сплавов, технологические схемы их прессования. Изложены вопросы течения металла, определения геометрических параметров пластической зоны, длительности и скорости деформации, сопротивления деформации при прессовании, а также расчеты силовых условий процесса и прессового инструмента на прочность. Рассмотрена разработка технологии прессования изделий специальной конфигурации.

Методы расчета сил, необходимых для деформирования заготовки в условиях холодной штамповки выдавливанием, разработанные на основе теории пластичности, не всегда позволяют учитывать наиболее важные факторы. Поэтому при разработке технологических процессов холодной штамповки выдавливанием часто используют результаты и рекомендации, полученные при экспериментальных исследованиях и накопленные производственной практикой. Теория холодной штамповки выдавливанием развивается и совершенствуется. На основе этой теории должны быть решены следующие основные задачи: определение удельных деформирующих

сил, работы деформации и давлений на контактных поверхностях заготовки и рабочего инструмента, что необходимо при выборе оборудования для штамповки, его проектировании и расчете на прочность рабочего инструмента; разработка методик определения напряжений в рабочем инструменте под действием рабочих давлений на контактных поверхностях и предварительного натяга, расчета его на прочность; определение кинематического, деформированного и напряженного состояния заготовки в процессе деформирования, обоснование и создание условий, обеспечивающих возможность деформирования при приложении меньших деформирующих сил; оценка предельного формоизменения за один переход на основе применения современных теорий разрушения при пластическом деформировании.

Необходимость решения этих задач привела к совершенствованию, дальнейшему развитию существующих и созданию новых методов анализа технологических задач обработки давлением. Так, применяемый в настоящее время метод решения приближенных уравнений, кроме равновесия и пластического состояния, включает кинематические (деформационные) уравнения и уравнения связи между напряжениями и скоростями деформаций (деформациями). Соответствие результатов, полученных на основе теории, данным экспериментальных исследований зависит от того, насколько математическая модель согласуется с реальным анализируемым процессом. В технологии обработки давлением анализируемые процессы характеризуются свойствами обрабатываемых металлов и сплавов и скоростью приложения внешней нагрузки.

Решение задач на основе теории пластичности в такой постановке с одновременным учетом упрочнения, скорости деформирования, анизотропии свойств, температурного эффекта и других факторов приводит к непреодолимым математическим трудностям и затруднено вследствие отсутствия исходных данных, соответствующих действительным условиям штамповки. Напряжение текучести, как правило, определяют в условиях статического приложения внешней нагрузки, хотя скорости деформаций при выполнении операций обработки давлением изменяются в достаточно широких пределах и приложение нагрузки ближе к динамическому. Влияние

температурного эффекта в процессе деформирования на напряжение текучести также не учитывается.

Течение материала в процессах штамповки выдавливанием является сложным и зависит от большого числа факторов. В простых операциях штамповки выдавливанием пластическое течение определяется схемой сил, воздействующих на заготовку; пластическими свойствами металла; геометрией заготовки и рабочего инструмента и другими факторами. Достоверность полученных результатов исследований в значительной мере определяется соответствием их математической модели, описывающей реальный процесс штамповки выдавливанием. Она связана со значительным изменением внешней формы и размеров заготовки в процессе выполнения операций штамповки выдавливанием, благодаря чему форма и размеры очага пластической деформации не всегда остаются неизменными. Одним словом может быть неустановившееся течение с тем, что не весь объем заготовки в процессе операции находится в состоянии пластичности, с неоднородным и неравномерным распределением скоростей течения в очаге пластической деформации и равномерной скоростью течения жестких частей заготовки, что влияет на выбор граничных условиях, со сложностью форм заготовки и рабочего инструмента, с условием трения на контактных поверхностях между заготовкой и инструментом.

Таким образом, в теории штамповки выдавливанием важными этапами являются выбор и обоснование соответствия математической модели реальному рассматриваемому процессу.

Наиболее распространенной моделью обрабатываемого материала является идеальное жесткопластическое тело, к которому приложена статическая внешняя нагрузка. Использование ЭВМ расширяет возможности и позволяет решать технологические задачи пластичности, относящиеся к плоскому напряженному, плоскому деформированному или осесимметричному состоянию. В последнее время предприняты успешные попытки решать еще более сложные задачи. Заслуживают внимания методы анализа на основе теории пластичности, применяемые в теории обработки металлов давлением, которые при достаточно грубых допущениях позволяют

получить аналитические зависимости для определения деформирующих сил с учетом упрочнения и условий трения.

При использовании модели идеального жесткопластического тела для анализа технологических операций важен правильный выбор напряжений текучести. Если в качестве напряжения текучести выбирать первоначальный предел, то результаты при определении силовых и энергетических параметров могут оказаться заниженными. Если напряжение текучести принимать соответствующим максимальной деформации, то результаты могут оказаться завышенными. По-видимому, наиболее целесообразно в каждом частном случае определять среднеинтегральное значение интенсивности деформаций и для него по диаграмме упрочнения выбирать напряжение текучести. Определение среднеинтегральной интенсивности деформации проведено Л. Г. Степанским [146].

В процессе пластического деформирования металлов и сплавов происходит поворот кристаллографических осей отдельных зерен, в результате чего появляется текстура преимущественной ориентировки. В этом случае прочность и пластичность зависят от направления, т.е. металл становится анизотропным. В процессах штамповки наиболее существенно проявление анизотропии свойств листового материала. При анализе технологических операцийковки и штамповки сортового проката анизотропию их свойств в большинстве случаев не учитывают. Итак, в данном случае анализа процессов штамповки выдавливанием в качестве модели принимается идеальное жесткопластическое изотропное тело.

Согласно схеме напряженного состояния поковки, получаемые в результате выдавливания - обратного и прямого, радиального и редуцирования в большинстве представляют собой тела вращения с осевой симметрией. Заготовки, предназначенные для получения этих поковок, также обладают осевой симметрией. Приложение внешней нагрузки и течение металла при этих операциях также сохраняют осевую симметрию.

1.4. Анизотропия материала заготовок и ее влияние на процессы пластического деформирования

Листовой металл, используемый в процессах обработки металлов давлением, обладает начальной анизотропией механических свойств. Анизотропия листа является следствием различия режимов прокатки и термической обработки [4, 32, 66, 173, 175] и, в частности, образования текстуры предпочтительной ориентировки кристаллографических осей в зернах обрабатываемого материала, характера распределения и ориентировки фаз дефектов металла и остаточных напряжений, возникающих вследствие неоднородности пластической деформации при прокатке [2, 3, 25, 32, 66]. При деформации зерна и включения приобретают вытянутую форму, которая после отжига переходит в строчечную структуру, в результате чего свойства, в том числе и механические, вдоль и поперек направления прокатки могут резко различаться.

Изучение кинетики развития текстуры при холодной прокатке показало, что анизотропия в общем случае возрастает с увеличением деформации до определенного предела, после которого изменяется уже мало [173, 175]. Анизотропию механических свойств прокатанного листа можно уменьшить разбросом текстуры относительно направления прокатки.

Анизотропия механических свойств металлов проявляется в различии пределов текучести $\sigma_{0,2}$, временного сопротивления разрыву σ_a , относительного удлинения δ и других параметров в разных направлениях плоскости листа. Для характеристики анизотропии используют различные показатели, например показатель анизотропии относительного удлинения и показатель анизотропии временного сопротивления разрыву. Однако указанные показатели характеризуют анизотропию механических свойств только вдоль и поперек прокатки, что недостаточно для объективной оценки анизотропии материала, так как целый ряд материалов имеет одинаковые значения пределов текучести, временного сопротивления разрыву, относительного удлинения вдоль и поперек прокатки, но различные в других направлениях.

Для оценки анизотропии механических свойств листового материала наиболее часто применяются коэффициенты анизотропии R_φ , которые представляют собой отношение логарифмических деформаций по ширине ε_b и толщине ε_z образцов, вырезанных под углами φ по отношению к направлению прокатки, при испытании на растяжение.

Для изотропного материала это отношение равно единице. Различают трансверсально-изотропное тело, когда коэффициент анизотропии практически одинаков в различных направлениях по отношению к направлению прокатки листа, но отличен от единицы, и плоскостную анизотропию, когда коэффициент анизотропии различен в различных направлениях относительно направления прокатки в плоскости листа.

Влияние анизотропии механических свойств на штампуемость листовых материалов и качество получаемых изделий часто связывается с величиной среднего коэффициента анизотропии R , определяемого как среднее арифметическое коэффициентов анизотропии в разных направлениях в плоскости листа.

Целый ряд работ [3, 4, 32, 46, 53, 55, 67, 157, 159, 175] посвящен отработке методик и экспериментальному определению коэффициентов анизотропии. Обычно величину коэффициента анизотропии R определяют по данным измерения ширины и толщины образца в зоне расчетной длины при деформации растяжения образца на 15...20 % в области равномерной деформации. Часто величину R находят при максимальной равномерной деформации образцов. Ширину образцов рекомендуется брать не менее 15 мм, в противном случае обнаруживается тенденция увеличения разброса величины R . Некоторые исследователи вместо замеров толщины определяли деформацию по длине и ширине образца, а затем, используя условие постоянства объема, вычисляли деформацию по толщине. Этот способ позволяет исключить относительно большие погрешности измерений толщины. Отмечается, что определение R усложняется неоднородностью материала, которая приводит к искажению боковой поверхности образца даже в области квазиравномерной деформации. Установлено, что значение коэффициента нормальной анизотропии для большинства листовых материалов изменяется в пределах от 0,2 до 3,5.

Авторами работ [173, 175] экспериментально показано, что анизотропия упрочнения имеет место при одноосном растяжении образцов, т.е. коэффициент анизотропии R_φ зависит от степени деформации образцов, при которой он определяется. Описанные методы определения коэффициентов анизотропии отличаются большой трудоемкостью как при подготовке к испытанию, так и при обработке результатов испытаний. В целях устранения указанных недостатков разрабатываются методики определения анизотропии механических свойств на испытательных машинах с использованием специальных механических устройств в тензоблоках [175].

В основу теоретических исследований анизотропного тела положены различные условия пластичности ортотропных тел - Мизеса-Хилла, Ху и Мэрина, Нориса и Мак-Кинена, Ивлева, Прагера, Сен-Венана, Жукова, Бастуна и Черняка, Ашкенази [3, 5, 7, 19, 35, 52, 54, 149, 173, 175]. При анализе процессов обработки металлов давлением наибольшее распространение получило условие пластичности Мизеса - Хилла и ассоциированный закон пластического течения [159].

Основу теории составляют предположения о квадратичной относительно напряжений форме условия текучести, несжимаемости материала, совпадении функции текучести с пластическим потенциалом скоростей деформации при изотропном упрочнении материала и отсутствии упрочнения.

Один из вариантов этой теории развит Ю.М. Арышенским. В рамках предложенной им теории разработаны инженерные методики для учета анизотропии и произведена реализация их при анализе силовых и деформационных параметров ряда операций листовой штамповки, в частности вытяжки [3].

Экспериментальная проверка условия пластичности Мизеса-Хилла при одноосном растяжении плоских образцов и в случае сложного напряженного состояния показывает удовлетворительное согласование расчетных и опытных данных [173, 175].

Основные уравнения плоской деформации анизотропного тела получены Р. Хиллом [159]. В ряде работ [12, 24, 61, 72, 83, 128, 137, 145, 154, 159, 160, 161, 168, 173, 175] рассмотрены прикладные аспекты анализа процессов обработки металлов

давлением: внедрение штампа в анизотропную среду, волочение полосы через клиновую матрицу, сжатие и перекусывание полосы и т.д.

В процессе обработки давлением исходная анизотропия листовых материалов изменяется и развивается деформационная анизотропия [32, 175]. При анализе технологических процессов ОМД в настоящее время учитывается начальная анизотропия механических свойств. Учет влияния начальной анизотропии осуществляется в рамках идеально пластического или изотропно упрочняющегося тела. Однако указанные предположения не позволяют оценить изменение анизотропии механических свойств в процессе пластической обработки.

Математические модели деформационного упрочнения материалов рассмотрены в работах [3, 19, 35, 52, 168, 173, 175, 195, 196]. Среди математических моделей, описывающих упрочнение материала, следует выделить модель изотропного упрочнения, когда поверхность нагружения (изотропно) расширяется во всех направлениях в пространстве напряжений, модель трансляционного упрочнения, связанного с перемещением поверхности нагружения в пространстве напряжений как жесткого целого, и модель комбинированного упрочнения, когда поверхность нагружения одновременно изотропно расширяется и перемещается в пространстве напряжений. Последние две модели отражают деформационное анизотропное упрочнение материала и учитывают эффект Баушингера.

В настоящее время в научно-технической литературе [75, 76, 83, 175] появились работы, связанные с разработкой математических моделей анизотропного упрочнения ортотропного тела в рамках теории пластичности Мизеса - Хилла. Предполагается, что поверхность нагружения не перемещается в пространстве напряжений, а анизотропно расширяется во всех направлениях. В качестве параметров упрочнения вводятся энергетические или деформационные параметры.

Предельные возможности формоизменения при ОМД существенно зависят от анизотропии механических свойств заготовки. Величина предельной степени деформации обычно оценивается исходя из условий локальной потери устойчивости материала при пластическом деформировании, накопления повреждаемости материала в процессе формоизменения до определенного уровня и достижения наи-

большого растягивающего напряжения своей предельной величины [11, 25, 36, 62, 63, 64, 126, 127, 134, 147].

Вопросы устойчивости листовой заготовки в условиях двухосного растяжения при плоском напряженном состоянии анизотропных тел рассматривались А.Д. Томленовым, В.Д. Головлевым, Ф.И. Рузановым, Н.Н. Малининым и другими [25, 71, 72, 134, 136, 154].

В работах [1, 3, 14, 24, 25, 66, 68, 75, 76, 83, 168, 173, 175, 191, 193, 194, 198] показано, что анизотропия механических свойств материала заготовки оказывает существенное влияние на силовые и деформационные параметры процессов обработки металлов давлением и на качество получаемых изделий.

Исследования процесса вырубki круглых заготовок из листа показывают, что качество среза улучшается при увеличении величины R_{ϕ} , вследствие чего рекомендуется использовать листы с коэффициентами анизотропии больше 1 для деталей, получаемых вырубкой. Кроме того, при использовании трансверсально-изотропного материала разделение металла получается наиболее однородным [32].

При вытяжке плоскостная анизотропия проявляется в образовании фестонов, что вызывает необходимость в обрезке края детали и потери металла. Фестонообразование сопряжено с неравномерностью толщины стенок деталей и трудностями, связанными со съемом их с пуансона после вытяжки.

Образование фестонов приводит также к появлению расслоений и наплывов. Результаты экспериментального исследования фестонообразования в зависимости от исходной анизотропии заготовок и технологических параметров вытяжки приводятся в работах [25, 32, 168, 173, 175]. Установлено, что существенное влияние на фестонообразование оказывают степень исходной плоскостной анизотропии, коэффициент вытяжки и относительный зазор между матрицей и пуансоном. Другие факторы - геометрия инструмента, сила прижима, смазка, толщина материала - влияют незначительно. Уменьшению фестонов способствует принудительное утонение стенок вытягиваемой детали.

Многими исследователями установлено, что расположение фестонов связано с видом кривой изменения коэффициента анизотропии от угла вырезки образца по

отношению к направлению прокатки. Если эта кривая обращена выпуклостью вверх, то фестоны образуются в направлениях, составляющих приблизительно угол 45° с направлением прокатки, а если кривая обращена выпуклостью вниз, то фестоны образуются в направлениях, составляющих углы 0 и 90° с направлением прокатки. По данным М. К. Смита, фестоны образуются в направлениях наиболее низкого сопротивления деформации. Ф. Айзенколб показал, что после рекристаллизационного отжига расположение фестонов относительно направления прокатки зависит от степени обжатия предшествовавшей холодной прокатки листа. Так, у холоднокатаных листов со степенью обжатия менее 30% после ре-кристаллизационного отжига фестоны образуются в направлениях под углом 45° относительно направления прокатки, а при более значительном обжатии - под углами 0 и 90° .

При вытяжке стаканов из листовых материалов с изотропными свойствами происходит утолщение стенки стакана по образующей, достигающее обычно $25\ldots 35\%$ (от исходной толщины) на крае стакана.

При вытяжке анизотропных материалов в связи с фестонообразованием, обусловленным различием механических свойств в разных направлениях, толщина стенки изменяется не только по образующей стакана, но и по его периметру; причем в большей степени изменение толщины происходит по впадине и в меньшей - по фестону. Очевидно, что в этом случае разнотолщинность стенки по образующей и по периметру характеризует качество и точность вытянутого стакана.

В ряде случаев отмечается положительное влияние анизотропии на процесс вытяжки - обеспечивает большую степень вытяжки, препятствует потере устойчивости стенки вытягиваемой детали и позволяет получить детали с большей конструктивной жесткостью.

В работах [168, 126, 175] даны конкретные рекомендации по построению профильной заготовки с целью уменьшения фестонообразования при вытяжке и комбинированной вытяжке.

Влияние анизотропии пластических свойств материала на способность листовых материалов к вытяжке изучены в работах [1, 25, 32, 173, 175]. Показано существенное влияние коэффициента нормальной анизотропии на способность металла к

глубокой вытяжке осесимметричных деталей и плоскостной анизотропии в случае вытяжки несимметричных изделий.

Головлевым В.Д. [25] установлено существенное влияние анизотропии на образование складок при вытяжке. Им показано, что в некоторых случаях игнорирование анизотропии заготовки при расчетах процессов пластического формоизменения может привести к значительным отклонениям расчетных величин критических деформаций от действительных величин.

Авторами работ [48, 59, 82, 83, 91, 92, 173-186] выполнены теоретические исследования процессов вытяжки, комбинированной вытяжки, вытяжки с утонением стенки и многоступенчатой вытяжки осесимметричных деталей из анизотропных упрочняющихся материалов при различных температурно-скоростных режимах деформирования. Исследования процессов глубокой вытяжки выполнены в предположении, что в заготовке реализуется плоское напряженное или плоское деформированное состояние.

Результаты теоретических исследований процесса осадки с кручением круглой листовой заготовки из анизотропного материала приведены в работах [75, 76]. Получены необходимые соотношения с учетом изменения ориентации главных осей анизотропии и разработан алгоритм расчета параметров напряженного и деформированного состояний и силовых режимов процесса. Установлено существенное влияние поворота главных осей анизотропии на формирование механических характеристик материала изделия.

Авторами исследований [88, 89] разработаны математические модели процессов обжима и раздачи трубных заготовок, обладающих цилиндрической анизотропией механических свойств, получены основные уравнения и соотношения для анализа операций обжима и раздачи анизотропных трубных заготовок. Выполнены теоретические исследования операций обжима конической матрицей и раздачи коническим пуансоном трубных анизотропных заготовок. Установлено влияние технологических параметров, условий трения на контактной поверхности пуансона и заготовки, анизотропии механических свойств трубной заготовки на напряженное и деформированное состояния заготовки, геометрические размеры заготовки, силовые

режимы и предельные возможности формообразования операций раздачи и обжима трубных заготовок коническим пуансоном.

Элементы теории формоизменения изотропных и анизотропных, разнородных двухслойных материалов в условиях плоского деформированного состояния получены ранее [90, 156, 174]. Разработана математическая модель деформирования двухслойных материалов в условиях плоского деформированного состояния, получены основные уравнения и соотношения, необходимые для анализа напряженного и деформированного состояний заготовки, силовых режимов и предельных возможностей формоизменения при вытяжке с утонением стенки цилиндрических деталей и волочении труб из двухслойных материалов, установлены закономерности влияния геометрических параметров двухслойного материала, заготовки и инструмента, степени деформации, условий трения контактных поверхностей инструмента и заготовки на распределение деформаций, напряжений, степени использования ресурса пластичности в основном и плакированном слоях в очаге деформации, силовые режимы, предельные возможности формоизменения цилиндрических деталей при вытяжке с утонением стенки, связанных с максимальной величиной растягивающих напряжений на выходе из очага пластической деформации и накоплением повреждаемости.

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию процесса вытяжки с утонением стенки, однако процессы пластического деформирования цилиндрических анизотропных заготовок в коническом (осесимметричное напряженное и деформированное состояния) канале мало изучены.

2. Выбор и обоснование оптимального варианта направления исследований

Значительный вклад в развитие теории пластичности и методов анализа процессов обработки металлов давлением, критериев локальной потери устойчивости и разрушения изотропных и анизотропных материалов внесли Ю.А. Аверкиев, А.Ю. Аверкиев, Ю.А. Алюшин, Ю.М. Арышенский, А.А. Богатов, С.И. Вдовин, Э. Ву, В.Д. Головлев, Ф.В. Гречников, С.И. Губкин, Г.Я. Гун, В.Л. Данилов, Г.Д. Дель, А.М. Дмитриев, Д. Друкер, Г. Закс, А.А. Ильюшин, Е.И. Исаченков, А.Ю. Ишлинский, Ю.Г. Калпин, Л.М. Качанов, В.Л. Колмогоров, М.А. Колтунов, В.Д. Кухарь, Д. Лубан, Н.Н. Малинин, А.Д. Матвеев, А.Г. Овчинников, В.А. Огородников, С.С. Одинг, Е.А. Попов, Ю.Н. Работнов, И.П. Ренне, К.И. Романов, Ф.И. Рузанов, Г. Свифт, Е.И. Семенов, И.А. Смарагдов, О.М. Смирнов, О.В. Соснин, Л.Г. Степанский, А.Д. Томленов, Е.П. Унксов, Р. Хилл, В.В. Шевелев, С.П. Яковлев, С.С. Яковлев и другие.

В работах этих ученых разработаны и усовершенствованы методы анализа процессов пластического формоизменения, даны их приложения к анализу деформирования листовых и цилиндрических заготовок.

Анализ указанных выше работ показывает, что листовая материал, используемый для процессов ОМД, обладает анизотропией механических свойств. Анизотропия проката является следствием образования текстуры предпочтительной ориентировки кристаллографических осей в зернах обрабатываемого материала, характера распределения и ориентировки фаз дефектов металла и остаточных напряжений, возникающих вследствие неоднородности пластической деформации при прокатке. При деформации зерна и включения приобретают вытянутую форму, которая после отжига переходит в строчечную структуру. В результате этого свойства, в том числе и механические, вдоль и поперек направления прокатки могут резко различаться.

Кристаллографическая текстура во многих случаях является определяющим фактором в создании анизотропии физических свойств металлических материалов. Следовательно, управляя текстурой, можно целенаправленно регулировать анизотропию их свойств, обеспечить оптимальные значения данной физической характе-

ристики в нужном для определенного изделия направлении и т.п. Кроме того, учитывая связь коэффициента пластической анизотропии R с упругими характеристиками материала и текстурой, можно создавать оптимальную текстуру, способствующую повышению штампуемости листов из данного материала. Для реализации на практике всех возможностей, связанных с кристаллографической текстурой, надо располагать информацией о закономерностях формирования текстуры в процессе различных обработок материала (пластическая деформация, рекристаллизационный отжиг и др.), а также об основных технологических факторах, влияющих на текстуру.

Величина коэффициента анизотропии для большинства листовых материалов, используемых в процессах пластического деформирования, изменяется в пределах от 0,2 до 3,5. Анизотропия механических свойств заготовок и деталей существенно зависит от предварительной пластической деформации и последующей термической обработки.

Начальная анизотропия механических свойств материала заготовки оказывает существенное влияние на силовые и деформационные параметры процессов пластического деформирования и на качество получаемых изделий. Она может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на процессы деформирования.

На основе проведенного обзора работ отмечается, что анализ технологических процессов обработки анизотропных металлов давлением в настоящее время осуществляется в рамках начально-анизотропного идеально пластического или изотропно упрочняющегося материала. Однако указанные предположения не позволяют оценить развивающуюся анизотропию механических свойств материала заготовки в процессе пластической обработки, о чем свидетельствует анализ экспериментальных исследований.

Наибольшее распространение при анализе процессов обработки металлов давлением нашла теория течения анизотропного материала Мизеса - Хилла, которая также не позволяет оценить изменение анизотропии механических свойств материала заготовки в процессах пластического деформирования.

Анализ экспериментальных исследований убедительно доказывает изменение этих свойств. В многооперационных технологических процессах обработки металлов давлением следует учитывать изменение анизотропии механических свойств

при назначении технологических параметров промежуточных и окончательных операций пластического деформирования. Кроме того, технические условия работы изделия часто требуют формировать определенную анизотропию механических свойств деталей.

Большинство существующих теорий анизотропного упрочнения начально изотропного и анизотропного тела основаны на изотропном расширении и перемещении поверхности нагружения в пространстве напряжений и отличаются друг от друга в подходе к описанию перемещения центра поверхности нагружения, которые могут задаваться в виде конечных и дифференциальных соотношений. Они разработаны для малых упругопластических деформаций.

В настоящее время практически отсутствуют феноменологические модели разрушения и критерии локальной потери устойчивости анизотропного материала, которые могут быть положены в основу интенсификации технологических процессов пластического формоизменения и обеспечивающие заданные технические требования на изготовление изделий.

Недостаточно изучен вопрос определения характеристик анизотропии механических свойств листовых материалов, констант кривых анизотропного упрочнения и разрушения ортотропных листовых материалов. В периодической литературе практически отсутствуют экспериментальные данные по перечисленным выше механическим характеристикам материалов, широко используемых в промышленности. Мало внимания уделялось теоретическому анализу процессов обработки металлов давлением кристаллических ортотропных анизотропно упрочняющихся листовых материалов.

Несмотря на большое количество работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям процессов многооперационной вытяжки, реверсивной вытяжки ступенчатых осесимметричных деталей, вопросы теории формоизменения анизотропных материалов в настоящее время практически не решены. Мало внимания уделяется в научно-технической литературе исследованиям напряженного и деформированного состояний заготовки, силовых режимов операций многооперационной вытяжки и реверсивной вытяжки ступенчатых осесимметричных деталей. Предельные возможности деформирования в основном определялись по максимальной величине растягивающего напряжения на выходе из очага пластической дефор-

мации. Оценка устойчивого протекания операций многооперационной вытяжки и реверсивной вытяжки осесимметричных ступенчатых деталей по степени ресурса пластичности и критерию локальной потери устойчивости анизотропной заготовки не производилась. Не решен широкий круг вопросов, связанных с проектированием технологических процессов многооперационной вытяжки и реверсивной вытяжки осесимметричных ступенчатых деталей и определением рациональных условий ведения этих процессов, обеспечивающих изготовление изделий заданного качества (величины накопленных микрповреждений и разнотолщинности стенок изготавливаемых деталей). Существующие исследования носят в основном экспериментальный характер.

В научно-технической литературе не решен широкий круг вопросов по влиянию 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 формирования показателей качества изготавливаемых осесимметричных деталей; по влиянию кристаллографической текстуры на коэффициент нормальной пластической анизотропии гексагональных плотноупакованных – металлов, длительности отжига на текстуру листов из гексагональных плотноупакованных – металлов, по установлению закономерностей изменения текстуры кристаллических материалов при многопереходной штамповки-вытяжки полусферических днищ, по влиянию режимов отжига на глубину газонасыщенного слоя полусферических днищ из титанового сплава ПТ-3Вкт, по выявлению влияния структуры и текстуры листового проката титанового сплава ПТ-3кт на характер разрушения в процессе многооперационной вытяжки, по установлению путей управления текстурой и структурой сварных соединений α -сплавов титана.

Проблема повышения качества и точности осесимметричных деталей остро стоит перед всеми предприятиями, которые имеют листоштамповочное производство.

3. Выбор и обоснование оптимального варианта направления исследований

На основе выполненного аналитического обзора современного состояния теории и технологии пластического деформирования кристаллических анизотропных материалов сформулированы следующие *основные задачи исследования*:

Этап I. Создание теории формообразования анизотропных кристаллических материалов при интенсивном пластическом деформировании и критериев локальной потери устойчивости и условия пластической потери устойчивости в виде гофрообразования листовых анизотропных кристаллических материалов при интенсивном пластическом деформировании.

1.1 Развитие теории пластического формообразования кристаллических ортотропных материалов с деформационной анизотропией механических свойств.

1.2 Разработка основных уравнений и соотношений для теоретического анализа операций пластического формообразования кристаллических анизотропных листовых заготовок.

1.3 Создание феноменологических моделей разрушения кристаллических анизотропных материалов по накоплению повреждаемости материала с учетом ускорение процесса повреждаемости под влиянием уже накопленных в материале повреждений.

1.4 Создание критериев локальной потери устойчивости кристаллических ортотропных анизотропно упрочняющихся материалов для плоского напряженного состояния заготовки, а также плоского напряженного и плоского деформированного состояний заготовки.

1.5 Разработка условия пластической потери устойчивости в виде гофрообразования (волнистости) прямоугольной пластины из анизотропного материала в условиях плоского напряженного состояния.

1.6 Проведение патентных исследований.

Этап II. Разработка теории деформирования анизотропных кристаллических материалов на первой и многоступенчатой операциях вытяжки, реверсив-

ной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем с учетом изменения толщины заготовки и упрочнения материала заготовки применительно к изготовлению полусферических и полуторовых днищ. Разработка экспериментальных основ формирования кристаллографической текстуры и анизотропии механических свойств материалов заготовок для изготовления изделий машиностроения ответственного назначения методами пластического формообразования.

2.1 Разработка математических моделей 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.

2.2 Создание алгоритмов расчета и пакета прикладных программ.

2.3 Установление влияния 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.

2.4 Установление влияния кристаллографической текстуры на коэффициент нормальной пластической анизотропии гексагональных плотноупакованных – металлов.

2.5 Выявление 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.

2.6 Установление влияния режимов отжига на глубину газонасыщенного слоя полусферических днищ из титанового сплава ПТ-3Вкт. Выявление влияния структуры и текстуры листового проката титанового сплава ПТ-3кт на характер разрушения в процессе многооперационной вытяжки.

2.7 Установление путей управления текстурой и структурой сварных соединений α -сплавов титана.

2.8 Проведение дополнительных патентных исследований.

Этап III. Создание технологических принципов разработки новых наукоемких технологических процессов изготовления ответственных изделий точного машиностроения из высокопрочных кристаллических материалов. Создание наукоемких, прогрессивных технологических процессов холодной штамповки тонкостенных полусферических и торовых днищ из анизотропных кристаллических материалов ракетно-космической техники.

3.1 Создание технологических принципов разработки новых наукоемких технологических процессов изготовления крупногабаритных тонкостенных полусферических и полуторовых днищ из высокопрочных кристаллических материалов.

3.2 Разработка научно обоснованных технологических решений изготовления крупногабаритных осесимметричных деталей с фланцем многооперационной вытяжкой полусферических днищ и реверсивной вытяжкой полуторовых днищ применительно к изготовлению деталей и узлов ракетно-космической техники.

3.3 Проведение дополнительных патентных исследований.

3.4 Создание высоких технологических процессов холодной штамповки крупногабаритных полусферических тонкостенных днищ из кристаллических материалов различных типоразмеров.

3.5 Разработка наукоемкого технологического процесса холодной штамповки осесимметричных деталей из алюминиевого сплава А5М.

3.6 Создание высоких технологических процессов штамповки полуторовых днищ различных типоразмеров из тонколистового алюминиевого сплава АМг6.

3.7 Проведение технико-экономической оценки полученных результатов.

3.8 Разработка программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс.

4. Основные уравнения и соотношения для теоретического анализа операций пластического формообразования кристаллических анизотропных листовых заготовок

Листовой материал, подвергаемый штамповке, как правило, обладает анизотропией механических свойств, обусловленной маркой материала, технологическими режимами его получения, которая может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивое протекание технологических процессов обработки металлов давлением.

В процессах пластического формоизменения исходная анизотропия листовых материалов изменяется и развивается деформационная анизотропия.

При анализе технологических процессов ОМД в настоящее время учитывается начальная анизотропия механических свойств.

Предельные возможности формоизменения при пластическом деформировании изотропных материалов, как правило, оцениваются по максимальной величине растягивающего напряжения на выходе из очага пластической деформации, а также по феноменологическим критериям разрушения, связанным с накоплением микроповреждений (по степени использования ресурса пластичности).

Ниже приведены основные уравнения и соотношения, необходимые для теоретического анализа процессов пластического деформирования, разработанные математические модели анизотропного упрочнения начально ортотропного тела, феноменологические критерии разрушения и шейкообразования анизотропного листового материала в условиях плоского напряженного, плоского напряженного и деформированного состояний заготовки.

4.1. Условие текучести и ассоциированный закон пластического течения ортотропного материала

Материал принимаем несжимаемым, жесткопластическим, ортотропным, для которого справедливы условие текучести Мизеса-Хилла:

$$2f(\sigma_{ij}) \equiv F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (4.1)$$

и ассоциированный закон пластического течения

$$\begin{aligned} d\varepsilon_x &= d\lambda[H(\sigma_x - \sigma_y) + G(\sigma_x - \sigma_z)]; & d\gamma_{yz} &= d\lambda L\tau_{yz}; \\ d\varepsilon_y &= d\lambda[F(\sigma_y - \sigma_z) + H(\sigma_y - \sigma_x)]; & d\gamma_{zx} &= d\lambda M\tau_{zx}; \\ d\varepsilon_z &= d\lambda[G(\sigma_z - \sigma_x) + F(\sigma_z - \sigma_y)]; & d\gamma_{xy} &= d\lambda N\tau_{xy}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

где F, G, H, L, M, N - параметры, характеризующие текущее состояние анизотропии; σ_{ij} - компоненты тензора напряжений в главных осях анизотропии; $d\varepsilon_x, d\varepsilon_y, d\varepsilon_z, d\gamma_{yz}, d\gamma_{xy}$ и $d\gamma_{zx}$ - компоненты тензора приращения деформаций; $d\lambda$ - коэффициент пропорциональности. Здесь x, y, z - главные оси анизотропии.

Параметры анизотропии F, G, H, L, M, N связаны с величинами сопротивления материала пластическому деформированию следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} 2F &= \frac{1}{\sigma_{sy}^2} + \frac{1}{\sigma_{sz}^2} - \frac{1}{\sigma_{sx}^2}; & 2L &= \frac{1}{\tau_{sy}^2}; \\ 2G &= \frac{1}{\sigma_{sz}^2} + \frac{1}{\sigma_{sx}^2} - \frac{1}{\sigma_{sy}^2}; & 2M &= \frac{1}{\tau_{szx}^2}; \\ 2H &= \frac{1}{\sigma_{sx}^2} + \frac{1}{\sigma_{sy}^2} - \frac{1}{\sigma_{sz}^2}; & 2N &= \frac{1}{\tau_{sxy}^2}, \end{aligned} \quad (4.3)$$

где σ_{sx}, σ_{sy} и σ_{sz} - величины сопротивления материала пластическому деформированию при растяжении в главных осях анизотропии; $\tau_{sxy}, \tau_{syx}, \tau_{syz}$ - величины сопротивления материала пластическому деформированию при сдвиге по отношению к главным осям анизотропии.

В случае изотропно-упрочняющегося начально ортотропного тела Р.Хиллом введены понятия интенсивности напряжений σ_i :

$$\sigma_i = \sqrt{3/[2(F+G+H)]} \left[F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad (4.4)$$

и приращения интенсивности деформации $d\varepsilon_i$

$$d\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{3}(F + G + H)} \left[F \left(\frac{Gd\varepsilon_y - Hd\varepsilon_z}{FG + GH + HF} \right)^2 + G \left(\frac{Hd\varepsilon_z - Fd\varepsilon_x}{FG + GH + HF} \right)^2 + H \left(\frac{Fd\varepsilon_x - Gd\varepsilon_y}{FG + GH + HF} \right)^2 + \frac{2d\gamma_{yz}^2}{L} + \frac{2d\gamma_{zx}^2}{M} + \frac{2d\gamma_{xy}^2}{N} \right]^{1/2}. \quad (4.5)$$

4.2. Плоское напряженное состояние анизотропного материала

Ряд процессов обработки металлов давлением, таких как вытяжка, обжим, раздача и другие, протекают в условиях плоского напряженного состояния листовой заготовки. Теоретические исследования напряженного и деформированного состояния заготовки, силовых режимов этих процессов выполняются на основе уравнений плоского напряженного состояния.

Для плоского напряженного состояния ($\sigma_z = 0$; $\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$) условие текучести (4.1) записывается в виде

$$(G + H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H + F)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1. \quad (4.6)$$

Кроме указанных выше характеристик анизотропии F , G , H и N , анизотропию механических свойств листовых материалов оценивают коэффициентом анизотропии R_β , который представляет собой отношение логарифмических деформаций по ширине и толщине образца, вырезанного под углом β к направлению прокатки при испытании его на растяжение:

$$R_\beta = \varepsilon_b / \varepsilon_z, \quad (4.7)$$

где ε_b - логарифмическая деформация по ширине; ε_z - логарифмическая деформация по толщине.

Коэффициенты анизотропии R_β связаны с параметрами анизотропии соотношением

$$R_{\beta} = \frac{\frac{H}{F} + \left(2\frac{N}{F} - 1 - \frac{G}{F} - 4\frac{H}{F}\right) \sin^2 \beta \cos^2 \beta}{\sin^2 \beta + \frac{G}{F} \cos^2 \beta}. \quad (4.8)$$

Выражение (4.8) позволяет определять коэффициент анизотропии в любом направлении листа относительно направления прокатки в зависимости от отношения параметров анизотропии H/F , N/F и G/F .

Величины сопротивления материала пластическому деформированию $\sigma_{s\beta}$ в различных направлениях β по отношению к направлению прокатки x в плоскости листа могут быть рассчитаны по выражению:

$$\sigma_{s\beta}^2 = \sigma_{s90}^2 (1 + H/F) / \left[\sin^2 \beta + \frac{G}{F} \cos^2 \beta + \frac{H}{F} + \left(2\frac{N}{F} - 1 - \frac{G}{F} - 4\frac{H}{F}\right) \sin^2 \beta \cos^2 \beta \right], \quad (4.9)$$

где σ_{s90} - сопротивление материала пластическому деформированию при растяжении образца, вырезанного в направлении, перпендикулярном направлению прокатки.

Отношения параметров анизотропии обычно определяются на основе измерений деформаций образцов, вырезанных в различных направлениях относительно направления прокатки, при их испытании на растяжение по зависимостям:

$$\frac{H}{F} = R_{90}; \quad \frac{G}{F} = \frac{R_{90}}{R_0}; \quad \frac{N}{F} = \left(R_{45} + \frac{1}{2}\right) \left(1 + \frac{R_{90}}{R_0}\right). \quad (4.10)$$

Определив коэффициенты анизотропии в направлениях 0 , 45 и 90° к направлению прокатки и параметр анизотропии F по выражению:

$$F = \frac{1}{\sigma_{s90}^2 \left(1 + \frac{H}{F}\right)}, \quad (4.11)$$

можно найти остальные параметры анизотропии.

Часто анизотропию в плоскости листа оценивают средним значением R , вычисленным по формулам:

$$R = \frac{R_0 + R_{90} + R_{45}}{3}; \quad R = \frac{R_0 + R_{90} + 2R_{45}}{4}. \quad (4.12)$$

Преобразуя условие текучести (4.6) к главным осям напряжений, получим

$$A_0 \sigma_1^2 + 2B_0 \sigma_1 \sigma_3 + C_0 \sigma_3^2 - 1 = 0, \quad (4.13)$$

где $A_0 = F \sin^2 \beta + G \cos^2 \beta + H + (2N - F - G - 4H) \sin^2 \beta \cos^2 \beta$;

$B_0 = -[H + (2N - F - G - 4H)] \sin^2 \beta \cos^2 \beta$;

$C_0 = F \cos^2 \beta + G \sin^2 \beta + H + (2N - F - G - 4H) \sin^2 \beta \cos^2 \beta$;

β - угол между главным направлением напряжения σ_1 и осью анизотропии x .

Для трансверсально-изотропного тела в главных напряжениях условие текучести примет вид:

$$\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \frac{2R}{1+R} \sigma_1 \sigma_3 = \sigma_s^2. \quad (4.14)$$

4.3. Плоское деформированное состояние анизотропного тела

Теоретические исследования таких процессов обработки металлов давлением, как прокатка листов, осадка призматических заготовок с большим отношением длины к ширине, вытяжка с утонением, волочение и выдавливание полых осесимметричных деталей и труб с большим отношением диаметра к толщине, проводятся на основе уравнений плоского деформированного состояния.

Пусть координатные оси x , y , z совпадают с главными осями анизотропии.

Выбираем такое состояние плоской деформации, чтобы главная ось анизотропии y была нормальна к плоскости течения. В этом случае деформация вдоль оси y отсутствует, т.е.

$$d\varepsilon_y = 0. \quad (4.15)$$

С учетом зависимостей между напряжениями и приращениями деформаций (4.2), отнесенных к главным осям анизотропии, и условия (4.15) найдем

$$\sigma_y = \frac{H\sigma_x + F\sigma_z}{H + F}. \quad (4.16)$$

Подставляя значение σ_y из (4.16) в условие текучести для анизотропного тела (4.1) и принимая во внимание, что для рассматриваемого случая $\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$, получим

$$\frac{FG + GH + FH}{H + F}(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 2M\tau_{xz}^2 = 1. \quad (4.17)$$

Введя обозначения c и τ_{sxz}

$$c = 1 - \frac{M(F + H)}{2(FG + GH + HF)}; \quad (4.18)$$

$$\tau_{sxz}^2 = \frac{1}{2M}, \quad (4.19)$$

условие текучести (4.17) приводится к виду

$$(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4(1 - c)\tau_{xz}^2 = 4\tau_{sxz}^2(1 - c), \quad (4.20)$$

где τ_{sxz} - сопротивление материала пластическому деформированию при сдвиге по отношению к осям x и z ; c - характеристика анизотропии тела в условиях плоской деформации; $-\infty < c < 1$.

Для материала изотропного и трансверсально-изотропного $c = 0$.

Условие текучести (4.20) для плоского деформированного состояния в главных осях напряжений имеет вид:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_{sxz} \sqrt{\frac{1 - c}{1 - c \sin^2 2\varphi}}, \quad (4.21)$$

где φ - угол между первым главным направлением напряжения σ_1 и осью анизотропии x .

Обозначив

$$\gamma_{II}(\varphi) = \sqrt{\frac{1 - c}{1 - c \sin^2 2\varphi}},$$

условие текучести (4.21) переписывается следующим образом:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_{sxz}\gamma_{II}(\varphi). \quad (4.22)$$

Характеристиками анизотропии при плоском деформированном состоянии являются сопротивление материала пластическому деформированию τ_{sxz} при сдвиге и величина “с”.

Для изотропного неупрочняющегося тела $c = 0$, $\tau_{sxz} = k$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k, \quad (4.23)$$

где k - пластическая постоянная материала.

4.4. Математические модели упрочнения кристаллического анизотропного материала

Среди математических моделей, описывающих упрочнения материала, следует выделить модели изотропного, трансляционного и комбинированного упрочнения материала при пластическом формоизменении.

Изотропное упрочнение - простейшая модель упрочняющегося тела. Она реализуется в предположении, что поверхность нагружения расширяется подобно начальной поверхности текучести. В этом случае пределы текучести растут пропорционально одному параметру упрочнения, и состояние анизотропии механических свойств исходной заготовки не изменяется.

Рассмотрим некоторые возможные математические модели анизотропного упрочнения.

Допустим, что поверхность нагружения не перемещается в пространстве напряжений, а анизотропно расширяется во всех направлениях.

Примем, что сопротивления материала пластическому деформированию в направлениях главных осей анизотропии x, y, z и при сдвиге в главных осях анизотропии подчиняются зависимостям

$$\sigma_{s_{ii}} = \sigma_{T_{ii}} + F_{ii}(\varepsilon_i) \cdot F_{1_{ii}}(\varepsilon_{ii}, \varepsilon_i); \quad \tau_{s_{ij}} = \tau_{T_{ij}} + F_{ij}(\varepsilon_i), \quad (4.24)$$

где $\sigma_{T_{ij}}$ и $\tau_{T_{ij}}$ - пределы текучести в соответствующих направлениях; $F_{ii}(\varepsilon_i)$ и $F_{ij}(\varepsilon_i)$ - функции, зависящие от величины интенсивности деформации ε_i , опреде-

ляемой с помощью выражения (4.5); $F1_{ii}(\varepsilon_{ii}, \varepsilon_i)$ - функции, зависящие от величины интенсивности деформации ε_i и компонент тензора деформаций ε_{ii} в главных осях анизотропии x , y и z ; i и j - принимают значения x , y и z .

В дальнейшем принимаем, что в случае совпадения индексов i и j , остается только один из них.

Следует отметить, что модель анизотропного упрочнения (4.24) при $F1_{ij}(\varepsilon_{ii}, \varepsilon_i) = 1$ переходит в модель анизотропного упрочнения от интенсивности деформации ε_i

$$\sigma_{s_{ii}} = \sigma_{T_{ii}} + F_{ii}(\varepsilon_i); \quad \tau_{s_{ij}} = \tau_{T_{ij}} + F_{ij}(\varepsilon_i), \quad (4.25)$$

а в случае равенства

$$F1_x(\varepsilon_i)/\sigma_{T_x} = F1_y(\varepsilon_i)/\sigma_{T_y} = F1_z(\varepsilon_i)/\sigma_{T_z} =$$

$F_{xy}(\varepsilon_i)/\tau_{T_{xy}} = F_{zx}(\varepsilon_i)/\tau_{T_{zx}} = F_{yz}(\varepsilon_i)/\tau_{T_{yz}} = F(\varepsilon_i)$ - в модель изотропного упрочнения вида

$$\sigma_{s_{ii}} = \sigma_{T_{ii}} [1 + F(\varepsilon_i)]; \quad \tau_{s_{ij}} = \tau_{T_{ij}} [1 + F(\varepsilon_i)].$$

Функции $F_{ii}(\varepsilon_i)$, $F_{ij}(\varepsilon_i)$ и $F1_{ii}(\varepsilon_i)$ могут быть определены из анализа системы опытов на растяжение, сжатие и чистый сдвиг образцов в главных осях анизотропии в исходном состоянии и образцов предварительно деформированных.

Структуры функций $F_{ii}(\varepsilon_i)$, $F_{ij}(\varepsilon_i)$ и $F1_{ii}(\varepsilon_{ii}, \varepsilon_i)$ в дальнейшем представим в виде соответственно

$$F_{ii}(\varepsilon_i) = A_{ii}(\varepsilon_i)^{n_{ii}}; \quad F_{ij}(\varepsilon_i) = A_{ij}(\varepsilon_i)^{n_{ij}}; \quad (4.26)$$

$$F1_{ii}(\varepsilon_{ii}, \varepsilon_i) = \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_{ii}}{\varepsilon_i} \right)^2 \right]^{m_{ii}}, \quad (4.27)$$

где A_{ii} , A_{ij} , n_{ii} , n_{ij} и m_{ii} - константы материала.

Учитывая соотношения (4.26) и (4.27), выражения для определения сопротивления материала пластическому деформированию (4.24) можно записать следующим образом

$$\sigma_{s_{ii}} = \sigma_{T_{ii}} + A_{ii}(\varepsilon_i)^{n_{ii}} \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_{ii}}{\varepsilon_i} \right)^2 \right]^{m_{ii}} ; \quad \tau_{s_{ij}} = \tau_{T_{ij}} + A_{ij}(\varepsilon_i)^{n_{ij}} . \quad (4.28)$$

В ряде случаев при отсутствии той или иной информации по анизотропии механических свойств исходного материала целесообразно принять равенство

$$\begin{aligned} F_x(\varepsilon_i)/\sigma_{T_x} &= F_y(\varepsilon_i)/\sigma_{T_y} = F_z(\varepsilon_i)/\sigma_{T_z} = \\ &= F_{xy}(\varepsilon_i)/\tau_{T_{xy}} = F_{zx}(\varepsilon_i)/\tau_{T_{zx}} = F_{yz}(\varepsilon_i)/\tau_{T_{yz}} , \end{aligned}$$

т.е.

$$n_x = n_y = n_z = n_{xy} = n_{yz} = n_{zx} = n$$

и

$$A_x/\sigma_{T_x} = A_y/\sigma_{T_y} = A_z/\sigma_{T_z} = A_{xy}/\tau_{T_{xy}} = A_{yz}/\tau_{T_{yz}} = A_{zx}/\tau_{T_{zx}} = A ,$$

и представить выражения (4.28) в виде

$$\sigma_{s_{ii}} = \sigma_{T_{ii}} \left\{ 1 + A(\varepsilon_i)^n \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_{ii}}{\varepsilon_i} \right)^2 \right]^{m_{ii}} \right\} ; \quad \tau_{s_{ij}} = \tau_{T_{ij}} \left[1 + A(\varepsilon_i)^n \right] . \quad (4.28^1)$$

Такое допущение позволяет значительно упростить систему экспериментальных исследований по определению параметров кривых анизотропного упрочнения ортотропного материала.

Замечания: Выбор предложенных выше моделей упрочнения для исследуемого листового материала осуществляется следующим образом. Рассматривается простейшая модель упрочнения анизотропного материала - изотропного упрочнения. Если величины коэффициентов анизотропии R_{β} в опытах на простейшее растяжение изменяются менее чем на 5% в пределах равномерной деформации, то эта модель закладывается в основу расчета процессов пластического формоизменения. Если это условие не выполняется, то анализируется однопараметрическая модель анизотропного упрочнения, предусматривающая использование кривых упрочнения в направлениях главных осей анизотропии x, y и z . Если же рассчитанные величины коэффициентов анизотропии R_{β} с учетом выражений (4.3) и (4.8) отличаются от экспериментальных более чем на 5% в пределах равномерной деформации, то необходимо переходить на более сложную модель - анизотропного упрочнения (4.28) (многопараметрическую).

4.5. Феноменологические модели разрушения кристаллических анизотропных материалов по накоплению повреждаемости материала

Предельные возможности формоизменения при пластическом деформировании часто оцениваются на базе феноменологических моделей разрушения. В основу этих моделей положен принцип накопления повреждаемости материала при деформировании. Наибольшее распространение получили деформационные и энергетические критерии разрушения, а в качестве характеристики повреждаемости материала обычно принимается степень использования ресурса пластичности, представляющая собой отношение накопленной интенсивности деформации или удельной (пластической) работы деформации к их предельным величинам при заданных характеристиках напряженного и деформированного состояния элементарного объема в очаге пластической деформации.

Предельные величины интенсивности деформаций и удельной работы разрушения определяются из диаграммы пластичности, полученной экспериментальным путем на основе испытаний материала в различных условиях деформирования. При теоретическом анализе процессов ОМД оценивается напряженное и деформированное состояния выделенного элемента очага деформации в процессе его формообразования, определяется повреждаемость материала заготовки на каждом этапе деформирования. В дальнейшем находится накопленная повреждаемость в процессе деформирования путем линейного или нелинейного принципа накопления повреждений. Предельные возможности деформирования определяются при достижении величины накопленной повреждаемости в процессе формоизменения, равной 1 или меньшего значения в зависимости от условий эксплуатации получаемого изделия.

В настоящее время феноменологические модели разрушения изотропного материала при пластическом деформировании развиты в работах В.Л. Колмогорова, А.А. Богатова, Л.Г. Степанского, Г.Д. Деля, В.А. Огородникова, Б.А. Мигачева и др.

В этих исследованиях показано, что при пластическом формоизменении величина интенсивности деформации в момент разрушения ε_{inp} и удельная пластиче-

ская работа разрушения A_{np} существенно зависят от показателя напряженного состояния σ/σ_i и параметра вида напряженного состояния Лоде-Надаи μ_σ .

Здесь $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ - среднее напряжение; σ_1, σ_2 и σ_3 - главные напряжения; σ_i - интенсивность напряжения; $\mu_\sigma = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_3 - \sigma_1)$ - параметр вида напряженного состояния Лоде-Надаи.

Ниже предложен деформационный критерий разрушения анизотропного материала при пластическом формоизменении.

4.5.1. Основные предположения и формулировка критериев разрушения

Феноменологический критерий разрушения заготовки из анизотропного материала разработан на основании экспериментальных исследований. Принимается, что при пластическом формоизменении интенсивность деформации в момент разрушения ε_{inp} существенно зависит от показателя напряженного состояния σ/σ_i и параметра вида напряженного состояния Лоде μ_σ , а также учитывается ориентация первой главной оси напряжений σ_1 относительно главных осей анизотропии x, y, z , определяемых углами α, β и γ .

По аналогии с работами В.Л. Колмогорова, А.А. Богатова, Ю.Н. Работнова, С.Т. Милейко, С.А. Шестерикова, Б.А. Мигачева предлагается критерий деформируемости записать в виде:

$$\omega_e = \int_0^{\varepsilon_i} \frac{d\varepsilon_i}{\varepsilon_{inp} (1 - \omega_e)^k} < 1. \quad (4.29)$$

Здесь ω_e - повреждаемость материала при пластическом формоизменении по деформационной модели разрушения; k - константа материала; $\varepsilon_{inp} = \varepsilon_{inp}(\sigma/\sigma_i, \mu_\sigma, \alpha, \beta, \gamma)$.

Интегрирование в выражении (4.29) ведется вдоль траектории рассматриваемых элементарных объемов. Отметим, что до деформации (при $t=t_0$) $\omega_e = 0$, а в момент разрушения (при $t=t_p$) $\omega_e = 1$.

В этом соотношении учитывается ускорение процесса повреждаемости под влиянием уже накопленных в материале повреждений.

При $k = 0$ получим деформационный критерий разрушения, предложенный В.А. Колмогоровым [93-95]:

$$\omega_e = \int_0^{\varepsilon_i} \frac{d\varepsilon_i}{\varepsilon_{inp}} < 1. \quad (4.30)$$

Если, кроме того, при нагружении показатель напряженного состояния σ/σ_i и параметр Лоде μ_σ не изменяется, то имеем

$$\varepsilon_i \leq \varepsilon_{inp}. \quad (4.31)$$

Оценка степени повреждаемости материала в деформационном критерии разрушения требует наличие информации о механических свойствах материала, напряженном и деформированном состояниях элементарного объема в очаге деформации, а также значения функциональной зависимости

$$\varepsilon_{inp} = \varepsilon_{inp}(\sigma/\sigma_i, \mu_\sigma, \alpha, \beta, \gamma).$$

Представим зависимости интенсивности деформации в момент разрушения ε_{inp} анизотропного тела в виде произведения двух функций:

$$\varepsilon_{inp} = f_1(\sigma/\sigma_i, \mu_\sigma) \cdot f_2(\alpha, \beta, \gamma), \quad (4.32)$$

где $f_1(\sigma/\sigma_i, \mu_\sigma)$ - функция, зависящая от показателя напряженного состояния σ/σ_i и параметра Лоде μ_σ ; $f_2(\alpha, \beta, \gamma)$ - функция, зависящая от направляющих косинусов, определяющих ориентацию первой главной оси напряжений σ_1 относительно главных осей анизотропии x, y и z .

В соответствии с рекомендациями, предложенными в работах В.Л. Колмогорова и А.А. Богатова [24, 93-95], в дальнейшем структуру функции $f_1(\sigma/\sigma_i, \mu_\sigma)$ выбираем в виде

$$f_1(\sigma/\sigma_i, \mu_\sigma) = [A_2 - (A_1 - A_2)\mu_\sigma] \exp\left\{ [B_2 - (B_1 - B_2)\mu_\sigma] \frac{\sigma}{\sigma_i} \right\} \quad (4.33)$$

или

$$f_1(\sigma/\sigma_i, \mu_\sigma) = \left[C_1 + C_2\mu_\sigma + (C_3 + C_4\mu_\sigma) \frac{\sigma}{\sigma_i} \right]. \quad (4.34)$$

Если при пластической деформации вид напряженного состояния не оказывает влияния на предельное значение степени деформации ε_{inp} , то функцию $f_1(\sigma/\sigma_i)$ удобно представить в виде

$$f_1(\sigma/\sigma_i) = A \exp\left(B \frac{\sigma}{\sigma_i} \right). \quad (4.35)$$

В выражениях (4.33) - (4.35) $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, C_3, C_4, A, B$ - константы материала.

Учет анизотропии механических свойств материала заготовки при пластической деформации будем осуществлять с помощью функции $f_2(\alpha, \beta, \gamma)$, которую выбираем в следующей форме соответственно:

$$f_2(\alpha, \beta, \gamma) = a_0 + a_1 \cos \alpha + a_2 \cos \beta + a_3 \cos \gamma, \quad (4.36)$$

где a_0, a_1, a_2 и a_3 - константы материала, зависящие от анизотропии механических свойств материала заготовки.

Таким образом, для определения предельной величины степени деформации имеем следующие выражения, которые учитывают природу материала, влияние показателя напряженного состояния σ/σ_i , анизотропию механических свойств исходной заготовки и параметра вида напряженного состояния μ_σ :

$$\varepsilon_{inp} = [A_2 - (A_1 - A_2)\mu_\sigma] \exp\left\{ [B_2 - (B_1 - B_2)\mu_\sigma] \frac{\sigma}{\sigma_i} \right\} \times (a_0 + a_1 \cos \alpha + a_2 \cos \beta + a_3 \cos \gamma); \quad (4.37)$$

$$\varepsilon_{inp} = \left[C_1 + C_2\mu_\sigma + (C_3 + C_4\mu_\sigma) \frac{\sigma}{\sigma_i} \right] (a_0 + a_1 \cos \alpha + a_2 \cos \beta + a_3 \cos \gamma); \quad (4.38)$$

$$\varepsilon_{inp} = A \exp\left(B \frac{\sigma}{\sigma_i}\right) (a_0 + a_1 \cos \alpha + a_2 \cos \beta + a_3 \cos \gamma). \quad (4.39)$$

Константы материала $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, C_3, C_4, A, B, a_0, a_1, a_2$ и a_3 находятся из системы опытов, реализуемых при различных значениях $\sigma/\sigma_i, \mu_\sigma$ и углах вырезки образцов по отношению к направлению прокатки x, y и z .

Как отмечалось выше, построение диаграмм пластичности для исследуемых материалов связано со значительными затратами материальных ресурсов, времени экспериментатора и наличием уникальных экспериментальных установок. Поставленная задача существенно упрощается, если использовать имеющиеся экспериментальные данные для различных материалов.

Накопленный богатый экспериментальный опыт по исследованию деформируемости изотропных материалов при пластической деформации позволяет выбрать вид функции $f_1(\sigma/\sigma_i, \mu_\sigma)$, заложенный в законах деформируемости анизотропного тела при пластическом формоизменении, которая учитывала бы природу материала.

В дальнейшем предлагается функцию $f_1(\sigma/\sigma_i, \mu_\sigma)$ выбирать в соответствии с родом материала (алюминиевые сплавы, медные сплавы, титановые сплавы, стали, высоколегированные стали и т.д.), а уточнение функциональной зависимости ε_{inp} осуществлять с помощью функции $f_2(\alpha, \beta, \gamma)$, которая может быть определена путем обработки экспериментальных данных по одноосному растяжению образцов, вырезанных под углами $0, 45$ и 90° к направлению прокатки.

В этом случае, зависимость интенсивности деформации в момент разрушения ε_{inp} анизотропного тела может быть представлена в виде произведения двух функций: интенсивности деформации в момент разрушения изотропного тела $\varepsilon_{inp_{из}} = f_1(\sigma/\sigma_i, \mu_\sigma)$ и функции от направляющих косинусов, определяющих ориентацию первой главной оси напряжений σ_1 относительно главных осей анизотропии x, y и z $f_2(\alpha, \beta, \gamma)$.

Окончательно будем иметь

$$\varepsilon_{inp} = \varepsilon_{inp_{uz}} (\sigma / \sigma_i, \mu_\sigma) \cdot f_2(\alpha, \beta, \gamma). \quad (4.40)$$

Величина интенсивности деформации в момент разрушения $\varepsilon_{inp_{uz}}$ изотропного тела может быть определена по формулам аналогичным (4.33)-(4.35), в которых коэффициенты $A, B, A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, C_3, C_4$ находятся для каждого рода материала на базе имеющейся информации.

Функцию $f_2(\alpha, \beta, \gamma)$ задаем в виде (4.36), где a_0, a_1, a_2, a_3 - коэффициенты, которые определяются из опытов на растяжение образцов, вырезанных под углами $0, 45$ и 90° по отношению к направлению прокатки, в условиях плоского напряженного и плоского деформированного состояний.

В частности, если величина интенсивности деформации в момент разрушения не зависит от параметра вида напряженного состояния μ_σ для изотропного тела, то выражения для её определения запишется

$$\varepsilon_{inp} = A \exp\left(B \frac{\sigma}{\sigma_i}\right) (a_0 + a_1 \cos \alpha + a_2 \cos \beta + a_3 \cos \gamma). \quad (4.41)$$

Можно значительно упростить оценку деформируемости анизотропного материала без разрушения в приближенной постановке, если в неравенстве (4.29) использовать минимальные значения величин $\varepsilon_{inp_{min}}$ от углов α, β и γ , т.е. использовать неравенства:

$$\omega_e = \int_0^{\varepsilon_i} \frac{d\varepsilon_i}{\varepsilon_{inp_{min}} (1 - \omega_e)^k} < 1, \quad (4.42)$$

где $\varepsilon_{inp_{min}}$ - величина минимальной интенсивности деформации в момент разрушения.

Критерий деформируемости (4.42) удобно использовать для теоретического анализа процессов обработки металлов давлением, так как отпадает необходимость определения ориентации первого главного напряжения σ_1 по отношению к главным осям анизотропии x, y и z .

В частности, при рассмотрении изотропного тела в выражениях (4.37) - (4.39) надо положить $a_0 = 1$ и $a_1 = a_2 = a_3 = 0$; для трансверсально-изотропного тела - $a_0 \neq 1$ и $a_1 = a_2 = a_3 = 0$.

Заметим, что приближенная оценка деформируемости анизотропного материала по формуле (4.42) в наиболее простом случае плоского напряженного состояния требует исследования зависимостей $\varepsilon_{inp}(\alpha)$ на экстремум с учетом их значений на границе $\alpha = 0$ и 90° для определения их минимальных значений. Если угол между первой главной осью напряжений $\alpha > \pi/2$, то необходимо обеспечить симметрию этой функции относительно главных осей анизотропии x, y и z .

Поскольку в научно-технической литературе приводится сравнительно мало экспериментальных данных о влиянии параметра вида напряженного состояния μ_σ на предельную величину интенсивности деформации, а также их противоречивый характер, в дальнейших исследованиях для определения этой величины будем использовать функцию вида (4.41).

4.5.2. Учет повреждаемости при исследовании пластического формоизменения

Анализ напряженного и деформированного состояния при пластическом формоизменении изотропных и анизотропных кристаллических материалов обычно осуществляется без учета накопления повреждаемости. Вопрос о разрушении заготовки в этих случаях, как указывалось выше, рассматривается путем линейного или нелинейного накопления повреждаемости при пластическом формоизменении.

Однако, как показали экспериментальные исследования, повреждаемость имеет место даже при малых деформациях, и, безусловно, она оказывает влияние на напряженное и деформированное состояния заготовки.

В связи с этим целесообразно в определяющие соотношения изменения сопротивления материала пластическому деформированию (4.28) ввести повреждаемость и принять соответственно

$$\begin{aligned}\sigma_{s_{ij}} &= \left[\sigma_{T_{ij}} + F_{ii}(\varepsilon_i) \cdot F_{1ii}(\varepsilon_{ii}, \varepsilon_i) \right] (1 - \omega_e)^k; \\ \tau_{s_{ij}} &= \left[\tau_{T_{ij}} + F_{ij}(\varepsilon_i) \right] (1 - \omega_e)^k,\end{aligned}\quad (4.43)$$

где ω_e - повреждаемость материала при пластическом формоизменении по деформационной модели разрушения; k - константа материала.

В этом случае выражения для определения сопротивления материала пластическому деформированию с учетом соотношений (4.43) можно записать следующим образом

$$\begin{aligned}\sigma_{s_{ii}} &= \left\{ \sigma_{T_{ii}} + A_{ii}(\varepsilon_i)^{n_{ii}} \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_{ii}}{\varepsilon_i} \right)^2 \right]^{m_{ii}} \right\} (1 - \omega_e)^k; \\ \tau_{s_{ij}} &= \left[\tau_{T_{ij}} + A_{ij}(\varepsilon_i)^{n_{ij}} \right] (1 - \omega_e)^k.\end{aligned}\quad (4.44)$$

Введение повреждаемости в соотношения для определения сопротивления материала пластическому деформированию значительно усложняет постановку задачи по анализу напряженного и деформированного состояний и требует одновременного расчета как компонент напряжений, деформаций, величины интенсивности деформаций, так и повреждаемости при пластическом формоизменении, однако позволят получить более реальную картину деформирования.

4.6. Критерии локальной потери устойчивости кристаллических ортотропных анизотропно упрочняющихся материалов

Методы оценки деформируемости заготовки, т.е. способности к той или иной технологической операции без разрушения, приобретают важное значение в связи с повышением требований к качеству продукции, рациональному использованию материала заготовки, назначению степеней деформации на каждой операции с целью повышения надежности и уменьшения их количества. Расчетная оценка деформируемости на стадии проектирования технологических процессов способствует его

интенсификации и позволяет предотвратить брак от разрушения материала в процессе обработки давлением, порчи внешнего вида изделия, отклонений от технических требований. Пластическое деформирование материалов осуществляется различными методами в условиях сложного напряженного и деформированного состояний с различным характером нагружения. Условия деформирования и свойства материала накладывают свои особенности на характер разрушения и предельные возможности деформирования.

Многие операции листовой штамповки (вытяжка без утонения стенки, обжим, раздача, отбортовка, формовка) осуществляются в условиях, близких к плоскому напряженному состоянию. Для них в случае высоких пластических свойств материала заготовок разрушение или порча внешнего вида изделия связано с локальной потерей устойчивости заготовки - местным утонением заготовки (шейкообразование, первичные и вторичные полосы скольжения) или образованием складок [48, 56, 119, 120, 187, 188].

Устойчивость формообразования листового металла - одно из основных условий получения штампованных изделий хорошего качества. При выполнении ряда технологических операций обработки металлов давлением, особенно в случае пластического формообразования тонкостенных оболочек и листовых заготовок, при достижении некоторой критической деформации процесс пластического деформирования становится неустойчивым. Превышение этой деформации приводит к потере устойчивости пластического формоизменения, ухудшению качества и разрушению материала заготовки [48].

Ниже предлагаются критерии локальной потери устойчивости (шейкообразования) ортотропного анизотропно-упрочняющегося листового материала при плоском напряженном, плоском напряженном и деформированном состояниях заготовки, полученные из условия положительности добавочных нагрузок.

4.6.1. Критерий локальной потери устойчивости кристаллических ортотропных анизотропно упрочняющихся материалов для плоского напряженного состояния заготовки

Прямоугольный лист из ортотропного материала толщиной h растягивается напряжениями σ_x и σ_y . Оси x, y и z совпадают с главными осями анизотропии.

Материал принимается несжимаемым жесткопластическим, ортотропным, для которого справедливы условие текучести Мизеса-Хилла (4.1) и ассоциированный закон пластического течения (4.2), а сопротивления материала пластическому деформированию в направлениях главных осей анизотропии x, y, z и при сдвиге в главных осях анизотропии подчиняются зависимостям (4.44).

Площади поперечного сечений листа перпендикулярных осям y и x определяются соответственно

$$l_x h = F_y; \quad l_y h = F_x. \quad (4.45)$$

Нагрузки на лист P_x и P_y равны

$$P_x = \sigma_x F_x; \quad P_y = \sigma_y F_y. \quad (4.46)$$

Из условия положительных добавочных нагрузок

$$\left. \begin{aligned} dP_x = \sigma_x dF_x + F_x d\sigma_x > 0; \\ dP_y = \sigma_y dF_y + F_y d\sigma_y > 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.47)$$

получаем условие устойчивости деформирования

$$\frac{d\sigma_x}{\sigma_x} > d\varepsilon_x; \quad \frac{d\sigma_y}{\sigma_y} > d\varepsilon_y. \quad (4.48)$$

Введем величину

$$m = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}. \quad (4.49)$$

В случае плоского напряженного состояния ($\sigma_z = 0$) величина интенсивности напряжений σ_e определяется по выражению

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{3}{2\left(1 + \frac{G}{F} + \frac{H}{F}\right)}} \left(m^2 + \frac{G}{F} + \frac{H}{F} - 2\frac{H}{F}m + \frac{H}{F}m^2 \right)^{1/2} \sigma_x. \quad (4.50)$$

Если учесть, что $\frac{G}{F} = \frac{R_y}{R_x}$ и $\frac{H}{F} = R_y$, то получим

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{3}{2(R_x + R_y + R_x R_y)}} \left[(R_x + R_x R_y) m^2 - 2R_y R_x m + (R_y R_x + R_y) \right]^{1/2} \sigma_x. \quad (4.51)$$

Обозначив

$$\frac{3(R_y + 1)R_x}{2(R_x + R_y + R_x R_y)} = a_y; \quad \frac{3R_y R_x}{2(R_x + R_y + R_x R_y)} = a_{xy};$$

$$\frac{3R_y(R_x + 1)}{2(R_x + R_y + R_x R_y)} = a_x,$$

выражение для определения величины интенсивности напряжений (4.51) преобразуется к виду

$$\sigma_i = \sigma_x \sqrt{a_x - 2a_{xy}m + a_y m^2}. \quad (4.52)$$

Установим связь между $d\varepsilon_x$ и $d\varepsilon_i$, $d\varepsilon_y$ и $d\varepsilon_i$, используя ассоциированный закон пластического течения (4.2) и выражения (4.49), (4.52):

$$d\varepsilon_x = \frac{a_x - a_{xy}m}{\sqrt{a_x - 2a_{xy}m + a_y m^2}} d\varepsilon_i; \quad d\varepsilon_y = \frac{a_y m - a_{xy}}{\sqrt{a_x - 2a_{xy}m + a_y m^2}} d\varepsilon_i. \quad (4.53)$$

Подставляя соотношения (4.52) и (4.53) в неравенства (4.48), получим

$$\frac{1}{z} = \frac{d\sigma_i}{\sigma_i d\varepsilon_i} > \frac{1}{2} \frac{\frac{da_x}{d\varepsilon_i} - 2\frac{da_{xy}}{d\varepsilon_i}m + \frac{da_y}{d\varepsilon_i}m^2 - 2a_{xy}\frac{dm}{d\varepsilon_i} + 2ma_y\frac{dm}{d\varepsilon_i}}{a_x - 2a_{xy}m + a_y m^2} +$$

$$+ \frac{a_x - a_{xy}m}{\sqrt{a_x - 2a_{xy}m + a_y m^2}}; \quad (4.54)$$

$$\frac{1}{z} = \frac{d\sigma_i}{\sigma_i d\varepsilon_i} > \frac{1}{2} \frac{m \left(m^2 \frac{da_y}{d\varepsilon_i} - 2m \frac{da_{xy}}{d\varepsilon_i} + \frac{da_x}{d\varepsilon_i} \right) + 2a_{xy}m \frac{dm}{d\varepsilon_i} - 2a_x \frac{dm}{d\varepsilon_i}}{m \left(m^2 a_y - 2a_{xy}m + a_x \right)} + \frac{a_y m - a_{xy}}{\sqrt{a_x - 2a_{xy}m + a_y m^2}}. \quad (4.55)$$

При простом нагружении $\frac{dm}{d\varepsilon_i} = 0$ эти неравенства упрощаются и принимают

следующий вид:

$$\frac{1}{z} = \frac{d\sigma_i}{\sigma_i d\varepsilon_i} > \frac{1}{2} \frac{\frac{da_x}{d\varepsilon_i} - 2 \frac{da_{xy}}{d\varepsilon_i} m + \frac{da_y}{d\varepsilon_i} m^2}{a_x - 2a_{xy}m + a_y m^2} + \frac{a_x - a_{xy}m}{\sqrt{a_x - 2a_{xy}m + a_y m^2}}; \quad (4.56)$$

$$\frac{1}{z} = \frac{d\sigma_i}{\sigma_i d\varepsilon_i} > \frac{1}{2} \frac{m^2 \frac{da_y}{d\varepsilon_i} - 2m \frac{da_{xy}}{d\varepsilon_i} + \frac{da_x}{d\varepsilon_i}}{m^2 a_y - 2a_{xy}m + a_x} + \frac{a_y m - a_{xy}}{\sqrt{a_x - 2a_{xy}m + a_y m^2}}. \quad (4.57)$$

Если материал, кроме того, изотропно упрочняется, то параметры a_x , a_y , a_{xy} будут постоянными величинами в процессе пластического деформирования и, следовательно, имеем

$$\frac{1}{z} = \frac{d\sigma_i}{\sigma_i d\varepsilon_i} > \frac{a_x - a_{xy}m}{\sqrt{a_x - 2a_{xy}m + a_y m^2}}; \quad (4.58)$$

$$\frac{1}{z} = \frac{d\sigma_i}{\sigma_i d\varepsilon_i} > \frac{a_y m - a_{xy}}{\sqrt{a_x - 2a_{xy}m + a_y m^2}}. \quad (4.59)$$

Критической является наименьшая из деформаций $\int d\varepsilon_i$, удовлетворяющих условиям (4.54) и (4.55), (4.56) и (4.57), (4.58) и (4.59), взятым со знаком равенства.

4.6.2. Критерий локальной потери устойчивости кристаллических ортотропных анизотропно упрочняющихся материалов для плоского напряженного и плоского деформированного состояний заготовки

Рассмотрим процесс двухосного растяжения прямоугольного листа из ортотропного материала толщиной h в условиях плоского напряженного ($\sigma_z = 0$) и плоского деформированного ($d\varepsilon_y = 0$) состояний напряжениями σ_x и σ_y . Здесь оси x , y и z совпадают с главными осями анизотропии.

Материал принимается несжимаемым жесткопластическим, ортотропным, для которого справедливы условие текучести Мизеса-Хилла (4.1) и ассоциированный закон пластического течения (4.2). Допускается, что сопротивления материала пластическому деформированию в направлениях главных осей анизотропии x, y, z и при сдвиге в главных осях анизотропии подчиняются зависимостям (4.44).

Условие положительности добавочных нагрузок в направлении действия максимального усилия в случае реализации плоского напряженного состояния будет иметь вид

$$dP_x = \sigma_x dF_x + F_x d\sigma_x > 0, \quad (4.60)$$

где $F_x = l_y h$ и l_y - площадь поперечного сечения и ширина листа в направлении, перпендикулярном главной оси анизотропии x ;

$$dF_x = dl_y h + l_y dh. \quad (4.61)$$

После подстановки выражения (4.61) в формулу (4.60) получим

$$\sigma_x dl_y h + \sigma_x l_y dh + l_y h d\sigma_x > 0. \quad (4.62)$$

Разделив каждое слагаемое выражения (4.62) на $\sigma_x l_y h$, имеем

$$\frac{d\sigma_x}{\sigma_x} + \frac{dl_y}{l_y} + \frac{dh}{h} > 0, \quad (4.63)$$

т.е.
$$\frac{d\sigma_x}{\sigma_x} + d\varepsilon_y + d\varepsilon_z > 0. \quad (4.64)$$

Используя условие несжимаемости материала $d\varepsilon_x + d\varepsilon_y + d\varepsilon_z = 0$ и учитывая, что деформация в направлении оси y равна нулю ($d\varepsilon_y = 0$), условие положительности добавочных нагрузок может быть записано в виде

$$\frac{d\sigma_x}{\sigma_x} > d\varepsilon_x. \quad (4.65)$$

В случае плоского напряженного состояния ($\sigma_z = 0$) величина интенсивности напряжения σ_i определяется по выражению (4.52).

Величина напряжения σ_y может быть найдена из ассоциированного закона пластического течения, принимая во внимание, что $d\varepsilon_y = 0$, следующим образом:

$$\sigma_y = \frac{H\sigma_x}{H + F} = \frac{R_y\sigma_x}{R_y + 1}. \quad (4.66)$$

В рассматриваемом случае имеем

$$m = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} = \frac{R_y}{R_y + 1}. \quad (4.67)$$

После подстановки выражения (4.67) в формулу (4.52) получим

$$\sigma_i = \sigma_x \sqrt{a_x - 2a_{xy} \frac{R_y}{R_y + 1} + a_y \left(\frac{R_y}{R_y + 1} \right)^2}. \quad (4.68)$$

Приращение деформации $d\varepsilon_x$ и приращение интенсивности деформации $d\varepsilon_i$ связаны между собой соотношениями (4.53).

Если запретить деформацию в направлении оси y , то нужно в выражении (4.53) положить $m = \frac{R_y}{1 + R_y}$. Приведенное выше соотношение с учетом выражения

(4.67) может быть записано в виде:

$$d\varepsilon_x = d\varepsilon_i \frac{a_x - a_{xy} \frac{R_y}{1 + R_y}}{\sqrt{a_x - 2a_{xy} \frac{R_y}{R_y + 1} + a_y \left(\frac{R_y}{R_y + 1} \right)^2}}. \quad (4.69)$$

Критерий локализации деформации (4.65) с учётом формул (4.68) и (4.69) преобразуется к виду

$$\frac{1}{Z} = \frac{d\sigma_i}{\sigma_i d\varepsilon_i} > \frac{1}{2} \frac{\frac{dA_x}{d\varepsilon_i} - 2 \frac{dA_{xy}}{d\varepsilon_i} + \frac{dA_y}{d\varepsilon_i}}{A_x - 2A_{xy} + A_y} + \frac{A_x - A_{xy}}{\sqrt{A_x - 2A_{xy} + A_y}}, \quad (4.70)$$

где

$$A_x = a_x; \quad A_{xy} = a_{xy} \frac{R_y}{R_y + 1}; \quad A_y = a_y \left(\frac{R_y}{R_y + 1} \right)^2.$$

Аналогичным образом может быть получен критерий локальной потери устойчивости при плоском напряженном (в плоскости $xу$) и деформированном (в плоскости $zу$; $d\varepsilon_x = 0$) состояниях.

Приведенный выше критерий шейкообразования может быть использован для предсказания предельных возможностей деформирования в условиях плоского напряженного и плоского деформированного состояний ортотропного анизотропно - упрочняющегося кристаллического материала.

5. Устойчивость трубной заготовки из кристаллического анизотропного материала в пластической области в виде образования складок

Технологические возможности многих процессов листовой штамповки лимитируются потерей устойчивости заготовки второго типа при ее формоизменении, т.е. явлением волнистости, складок, гофров на участках заготовки, деформируемых при сжимающих или сжимающих и растягивающих напряжениях. Теория устойчивости заготовок при их пластическом изменении является наименее разработанным разделом теории обработки металлов давлением. Изучение устойчивости заготовок при обработке металлов давлением усложняется тем, что заранее неизвестны формы и размеры заготовки в момент начала потери устойчивости, так как это явление возникает в процессе деформирования. Кроме того, напряженное состояние заготовки и интенсивность упрочнения изменяются в процессе формоизменения. Часто при анализе устойчивости заготовок при пластическом формоизменении используют статический критерий устойчивости, при использовании которого аналитические решения получаются более простыми. Сущность статического критерия устойчивости состоит в том, что рассматриваются состояния равновесия, бесконечно близкие к основному состоянию равновесия, т.е. при некотором значении нагрузки наряду с основной формой возможна другая форма равновесия, а именно, при несколько искривленной заготовке.

5.1. Основные соотношения и предположения

Рассмотрим осадку трубной заготовки с начальными и текущими размерами: средний радиус заготовки $R_{\text{н}0}$, высота h_0, h , толщина s_0, s (рисунок 5.1).

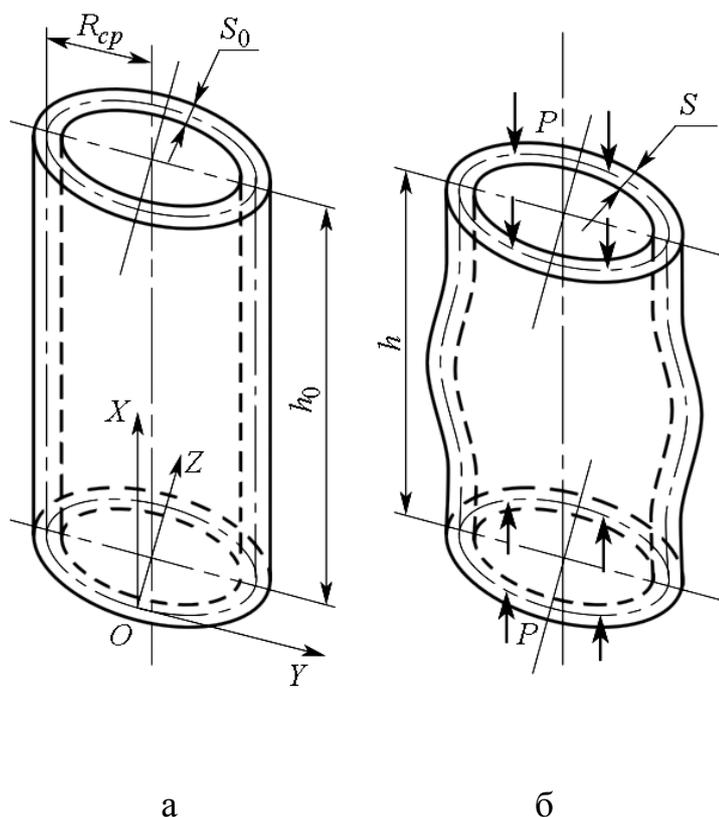


Рисунок 5.1. Цилиндрическая оболочка:

а – до деформирования; б – после потери устойчивости

Формоизменение трубной заготовки при потере устойчивости отличается от формоизменения пластин и стержней, так как с началом потери устойчивости в заготовке появляется дополнительное тангенциальное напряжение, возникающее вследствие увеличения диаметра срединной поверхности оболочки при ее выпучивании.

Принимается, что в начальной стадии потери устойчивости при осадке свободно опертой заготовки концы заготовки защемлены, что соответствует экспериментальным исследованиям [36, 168].

Материал заготовки цилиндрически ортотропный, подчиняется условию текучести Мизеса - Хилла (4.1) и ассоциированному закону течения (4.2)

$$\begin{aligned} \delta \varepsilon_x &= \frac{3}{2(H + F + G)} \frac{\delta \varepsilon_i}{\sigma_i} [H(\sigma_x - \sigma_y) + G(\sigma_x - \sigma_z)]; \\ \delta \varepsilon_y &= \frac{3}{2(H + F + G)} \frac{\delta \varepsilon_i}{\sigma_i} [F(\sigma_y - \sigma_z) + H(\sigma_y - \sigma_x)]; \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\delta\varepsilon_z = \frac{3}{2(H+F+G)} \frac{\delta\varepsilon_i}{\sigma_i} \left[G(\sigma_z - \sigma_x) + F(\sigma_z - \sigma_y) \right],$$

где интенсивность напряжений σ_i определяется по выражению

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{3}{2(F+G+H)}} \left[F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 \right]^{1/2}, \quad (5.2)$$

а приращение интенсивности деформаций $\delta\varepsilon_i$ как

$$\delta\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2(F+G+H)}{3}} \left[F \left(\frac{F\delta\varepsilon_y - H\delta\varepsilon_z}{FG+GH+HF} \right)^2 + G \left(\frac{H\delta\varepsilon_z - F\delta\varepsilon_x}{FG+GH+HF} \right)^2 + H \left(\frac{F\delta\varepsilon_x - G\delta\varepsilon_y}{FG+GH+HF} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (5.3)$$

Проведем анализ потери устойчивости заготовки на основании статического критерия устойчивости. Учитывая указанные выше особенности формоизменения цилиндрической заготовки при осевой осадке, запишем общее дифференциальное уравнение устойчивости в виде [16]

$$\frac{d^2(\delta M)}{dx^2} + \sigma_x \frac{sd^2\omega}{dx^2} + \frac{1}{R_{\tilde{n}\delta}} \delta T = 0; \quad (5.4)$$

$$\delta M = \int_{-s/2}^{+s/2} \delta\sigma_x z dz; \quad \delta T = \int_{-s/2}^{+s/2} \delta\sigma_y dz, \quad (5.5)$$

где $R_{\tilde{n}\delta}$ - радиус срединной поверхности исходной заготовки, δT - изменение дополнительно возникшего при потере устойчивости окружной силы вследствие выпучивания срединной поверхности заготовки, ω - прогиб срединной поверхности заготовки.

Напряженное и деформированное состояния цилиндрической заготовки до момента потери устойчивости принимаются приближенно плоскими в виду отсутствия напряжений по толщине и деформаций срединной поверхности в окружном направлении ($\varepsilon_y = 0$). Рассматривается степень пластической деформации $\varepsilon_x \leq 0,3$.

5.2 Условие устойчивости цилиндрической заготовки

Преобразуем выражение для определения интенсивности напряжений и приращения интенсивности деформации так:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{3}{2(R_x + R_y + R_x R_y)}} \times \left[R_x(\sigma_y - \sigma_z)^2 + R_y(\sigma_z - \sigma_x)^2 + R_x R_y(\sigma_x - \sigma_y)^2 \right]^{1/2}; \quad (5.6)$$

$$\delta\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2(R_x + R_y + R_x R_y)}{3}} \left[\frac{R_x(\delta\varepsilon_y - R_y \delta\varepsilon_z)^2 + R_y(R_y \delta\varepsilon_z - \delta\varepsilon_x)^2}{(R_y + R_y^2 + R_x R_y)^2} + \frac{R_x R_y(\delta\varepsilon_x R_x - R_y \delta\varepsilon_y)^2}{(R_y + R_y^2 + R_x R_y)^2} \right]^{1/2}, \quad (5.7)$$

где $R_x = \frac{F}{G} R_y$, $R_y = \frac{H}{F}$ - коэффициенты анизотропии заготовки в направлениях оси и в тангенциальном направлении.

Поскольку $\delta\varepsilon_y = 0$, $\varepsilon_y = 0$, $\sigma_z = 0$, то

$$F(\sigma_y) + H(\sigma_y - \sigma_x) = 0; (F + H)\sigma_y = H\sigma_x; \sigma_y = \frac{H\sigma_x}{F + H}; \sigma_y = \frac{R_y \sigma_x}{1 + R_y}. \quad (5.8)$$

Принимая во внимание выражения (5.8) для определения σ_i , окончательно получим

$$\sigma_i = B(R_i)\sigma_x, \quad (5.9)$$

где

$$\delta\sigma_i = B(R_i)\delta\sigma_x; \quad (5.10)$$

$$B(R_i) = \sqrt{\frac{3}{2(R_x + R_y + R_x R_y)}} \left[\frac{R_x R_y^2 + R_y + 2R_y^2 + R_y^3 + R_x R_y}{(1 + R_y)^2} \right]^{1/2}.$$

Принимая во внимание $\delta\varepsilon_z = -\delta\varepsilon_x$, определим $\delta\varepsilon_i$:

$$\delta\varepsilon_i = C(R_i)\delta\varepsilon_x; \quad (5.11)$$

$$C(R_i) = \sqrt{\frac{2(R_x + R_y + R_x R_y)}{3}} \frac{1}{R_y^{1/2}} \frac{(R_x R_y + R_y^2 + 2R_y + 1 + R_x^3)^{1/2}}{1 + R_y + R_x}.$$

Запишем зависимость интенсивности напряжений σ_i от интенсивности деформаций в виде

$$\sigma_i = \sigma_{i0} + A\varepsilon_i^n. \quad (5.12)$$

Касательный модуль упрочнения E_k найдем по формуле

$$E_k = \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} = An\varepsilon_i^{n-1} = AnC^{n-1}(R_i)\varepsilon_x^{n-1}, \quad (5.13)$$

$$\sigma_x = \frac{\sigma_{i0} + AC^n(R_i)\varepsilon_x^n}{B(R_i)}. \quad (5.14)$$

Для определения приращения напряжения сжатия воспользуемся зависимостью между приращениями деформации и напряжениями (5.1):

$$\delta\varepsilon_x = \frac{3}{2(H+F+G)} \frac{\delta\varepsilon_i}{\sigma_i} [H(\sigma_x - \sigma_y) + G(\sigma_x - \sigma_z)].$$

Принимая во внимание, что

$$\sigma_z = 0, \quad \sigma_y = \frac{H\sigma_x}{F+G} = \frac{R_y\sigma_x}{1+R_y},$$

найдем

$$\delta\varepsilon_x = \frac{3}{2} \frac{R_y}{(R_x + R_xR_y + R_y)} \frac{\delta\varepsilon_i}{\sigma_i} \frac{R_xR_y + 1 + R_y}{1 + R_y} \sigma_x. \quad (5.15)$$

Отсюда следует

$$\sigma_x = \frac{2}{3} \frac{(R_x + R_xR_y + R_y)(1 + R_y)}{R_y(R_yR_x + 1 + R_y)} \frac{\sigma_i}{\delta\varepsilon_i} \delta\varepsilon_x, \quad (5.16)$$

$$\delta\sigma_x = B_1(R_i)E_k\delta\varepsilon_x, \quad (5.17)$$

где

$$B_1(R_i) = \frac{2}{3} \frac{(R_x + R_xR_y + R_y)}{R_y} \frac{(1 + R_y)}{R_yR_x + 1 + R_y}.$$

С момента появления складки начинает происходить осадка заготовки в основном за счет выпучивания стенки. Радиальные напряжения и деформации малы и ими можно пренебречь. Тогда $\delta\varepsilon_x = -\delta\varepsilon_y$. Отсюда следует, что

$$\delta\sigma_y = -\delta\sigma_x \frac{2R_xR_y + R_y}{2R_xR_y + R_x}. \quad (5.18)$$

Принимая во внимание выражение (5.18), будем иметь

$$\delta\sigma_y = B_2 E_k \delta\varepsilon_y, \quad (5.19)$$

где

$$B_2 = \frac{2(R_x + R_x R_y + R_y)(1 + R_y)(2R_x + 1)R_y}{3 R_y(R_y R_x + 1 + R_y)(2R_y + 1)R_x}.$$

По гипотезе плоских сечений при изгибе принимаем линейную зависимость приращения деформаций по толщине оболочки, т.е.

$$\delta\varepsilon_x = \delta\varepsilon_0 + z \frac{d^2\omega}{dx^2}; \quad \delta\varepsilon_y = -\frac{\omega}{R_{\text{н}\delta}}, \quad (5.20)$$

где $\delta\varepsilon_0$ - бесконечно малое приращение деформации срединной поверхности заготовки.

Решая совместно уравнения (5.4), (5.5), (5.17) – (5.20) после интегрирования, получаем

$$B_1(R_i)E_k \frac{s^2}{12} \frac{d^4\omega}{dx^4} + \sigma_x \frac{d^2\omega}{dx^2} - B_2(R_i)E_k \frac{\omega}{R_{\text{н}\delta}^2} = 0. \quad (5.21)$$

В рассматриваемом случае, когда трубчатая заготовка выпучивается наружу и концы ее заделаны, наиболее близкую кривую прогиба можно выразить функцией

$$\omega = \omega_0 \left[1 - \cos \frac{2\pi x}{h} \right] / 2. \quad (5.22)$$

Принятая функция удовлетворяет граничным условиям $\omega = 0$ и $d\omega/dx = 0$ при $x = 0$, $x = h$ и условию изгиба $\omega = \omega_0$; $d\omega/dx = 0$ при $x = h/2$. После подстановки принятого выражения функции ω и ее дифференциалов в уравнение (5.21) и математических преобразований получаем

$$\frac{B_1(R_i)E_k S^2 4\pi^4}{3h^4} - \sigma_x \frac{4\pi^2}{h^2} + B_2(R_i)E_k \frac{1/[\cos \frac{2\pi x}{h}] - 1}{R_{\text{н}\delta}^2} = 0. \quad (5.23)$$

В уравнении (5.23) величина $\cos \frac{2\pi x}{h}$ изменяется от -1 до +1. Теоретические кривые эквидистантны экспериментальным кривым при $\cos(2\pi x/h) = 1/2$ [16]. Учитывая это, подставим $1/2$ в уравнение (5.23) вместо $\cos(2\pi x/h)$, тогда получим

$$\sigma_{x\hat{\varepsilon}\delta} = E_k \left[B_1 \frac{\pi^2 s^2}{3h^2} + B_2 \frac{h^2}{R_{\hat{n}\delta}^2 4\pi^2} \right]. \quad (5.24)$$

Заметим, что если в выражении (5.24) принять $R_{\hat{n}\delta} = \infty$, получим выражение для определения критических сжимаемых напряжений пластины из ортотропного материала.

Подставляя в уравнение (5.24) значения σ_x и E_k из уравнений (5.14) и (5.13) и выражая текущие размеры заготовки через начальные (принимая $\varepsilon_x = \ln \frac{h_0}{h}$ и, следовательно, $h = h_0 / e^{\varepsilon_x}$, $s = s_0 e^{\varepsilon_x}$), получаем

$$\frac{\sigma_{i0} + AC^n(R_i)\varepsilon_x^n}{B} = E_k \left[B_1 \frac{\pi^2 s_0^2 e^{4\varepsilon_x}}{3h_0^2} + B_2 \frac{h_0^2}{4\pi^2 R_{\hat{n}\delta}^2 e^{2\varepsilon_x}} \right];$$

$$\frac{h_0}{s_0} = \frac{2\pi^2 e^{3\varepsilon_x} R_{\hat{n}\delta}}{\sqrt{3}} \sqrt{B(R_i)E_k B_1(R_i) /$$

$$/ \sqrt{[\sigma_{e0} + AC^n(R_i)\varepsilon_x^n]4\pi^2 R_{\hat{n}\delta}^2 e^{2\varepsilon_x} - B(R_i)E_k B_2(R_i)h_0^2}}. \quad (5.25)$$

В частном случае изотропного материала $R_x = R_y = 1$, учитывая $B = \sqrt{3}/2$;

$C = 2/\sqrt{3}$; $\sigma_i = A\varepsilon_i^n$; $B_1 = 4/3$; $E_k = \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} = An \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n-1} \varepsilon_x^{n-1}$, $B_2 = 4/3$, будем иметь

$$\frac{h_0}{s_0} = \pi e^{2\varepsilon_x} \sqrt{\frac{n}{3[\varepsilon_x - h_0^2 \alpha / 4\pi^2 R_{\hat{n}\delta}^2 e^{2\varepsilon_x}]}}. \quad (5.26)$$

Эта формула совпадает с формулой для определения h_0/s_0 при изотропном материале.

5.3 Обсуждение результатов расчетов

На рисунке 5.2 приведены графические зависимости изменения величины h_0/s_0 от степени деформации ε_x (при $R_{\hat{n}\delta} = r_0 = 50$ мм; $s_0 = 4$ мм) при осадке трубных заготовок из алюминиевого сплава АМгб и стали 08кп.

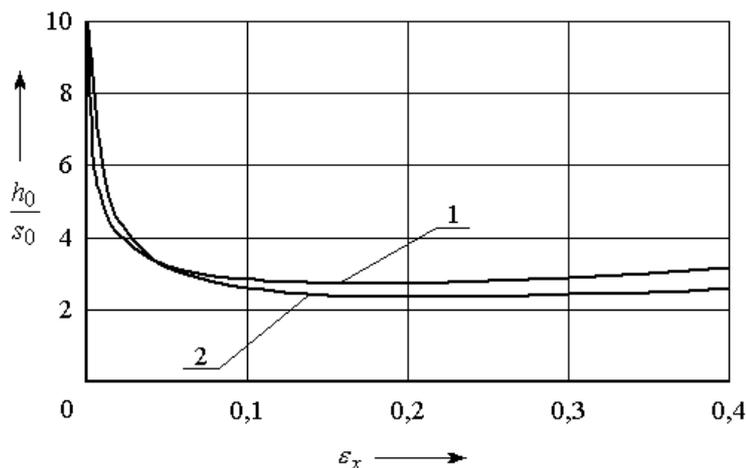


Рисунок 5.2. Зависимости изменения h_0/s_0 от ε_x :

кривая 1 – сталь 08 кп; кривая 2 – алюминиевый сплав АМг6

Расчеты выполнены для трубной заготовки из стали 08кп и алюминиевого сплава АМг6 со следующими механическими характеристиками и геометрическими размерами трубной заготовки: сталь 08кп - $\sigma_{i0} = 377,15$ МПа; $A = 488,9$ МПа; $n = 0,48$; $R_x = R_p = 0,817$, $R_y = R_\theta = 0,783$; алюминиевый сплав АМг6 - $\sigma_{i0} = 194,19$ МПа; $A = 275,11$ МПа; $n = 0,256$; $R_x = R_p = 0,67$; $R_y = R_\theta = 0,54$.

Анализ результатов расчетов показывает, что с увеличением степени деформации устойчивость заготовки и, следовательно, величина h_0/s_0 уменьшаются и, достигнув минимума, начинают возрастать в связи с увеличением толщины стенки заготовки, упрочнением материала и уменьшением высоты заготовки. Полученные зависимости справедливы до $h_0/R_{\tilde{n}\delta} \leq 6$. При больших значениях отношения у заготовки начинают возникать две выпучины на расстоянии от торцов до середины выпучины $l = h/4$.

Графические зависимости изменения величины h_0/s_0 от степени деформации ε_x и параметра деформационного упрочнения n представлены на рисунке 5.3. Расчеты выполнены для материала со следующими механическими характеристиками: $\sigma_{i0} = 377,15$ МПа; $A = 488,9$ МПа; $n = 0,48$; $R = 1$ ($R_{\tilde{n}\delta} = r_0 = 50$ мм; $s_0 = 4$ мм).

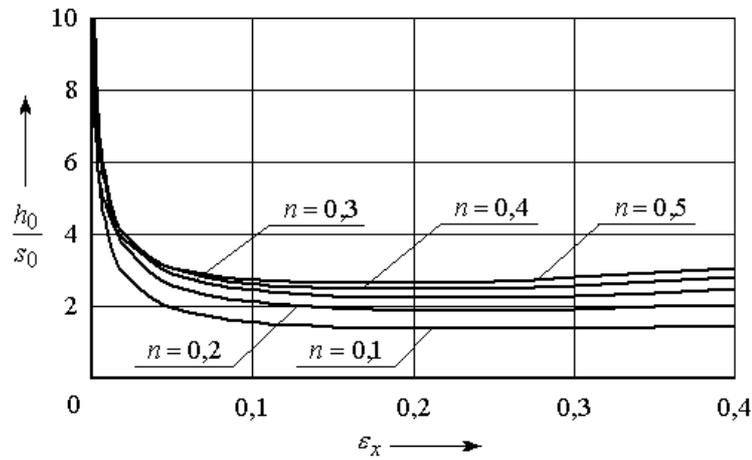
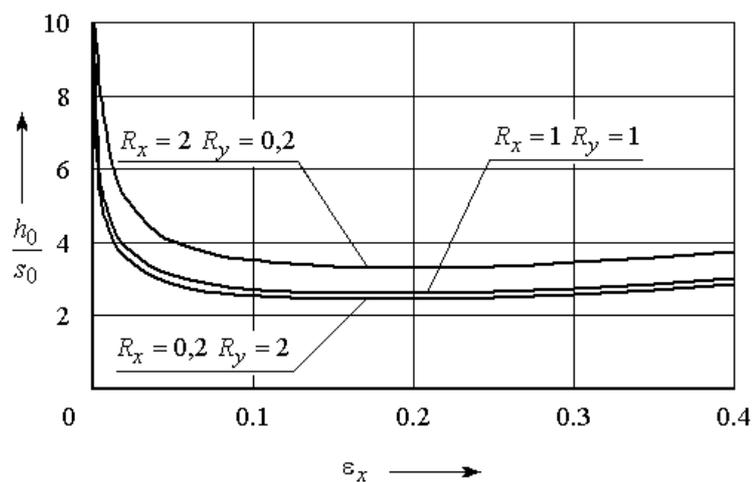


Рисунок 5.3. Зависимость h_0/s_0 от ε_x

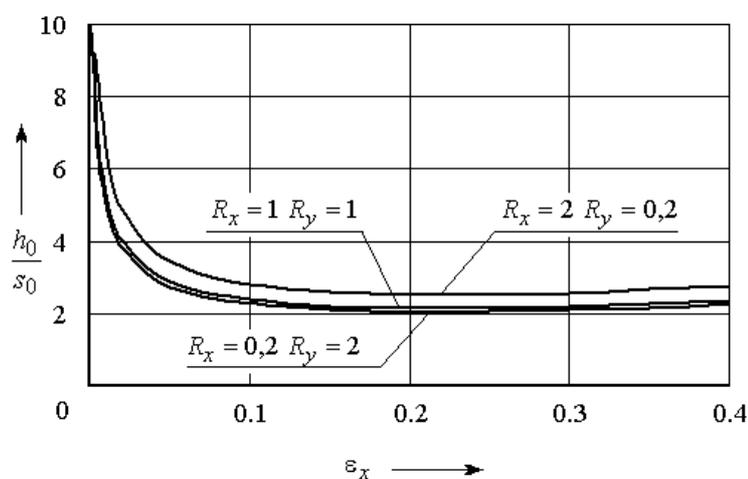
Установлено, что чем выше показатель деформационного упрочнения n , тем больше значение h_0/s_0 и выше устойчивость заготовки.

Приведенные соотношения позволили установить влияние цилиндрической анизотропии механических свойств исходной трубной заготовки на устойчивость в виде образования складок.

На рис. 5.4 приведены графические зависимости изменения величины h_0/s_0 от степени деформации ε_x : для первого материала $\sigma_{i0} = 377,15 \text{ МПа}$; $A = 488,9 \text{ МПа}$; $n = 0,48$; для второго материала $\sigma_{i0} = 194,19 \text{ МПа}$; $A = 275,11 \text{ МПа}$; $n = 0,256$. При следующих размерах трубных заготовок: $R_{\text{н}\delta} = 50 \text{ мм}$, $s_0 = 4 \text{ мм}$.



а



б

Рисунок 5.4. Зависимость величины h_0/s_0 от ε_x и R :
а – материал 1; б – материал 2

Анализ графических зависимостей показывает, что для материалов, обладающих цилиндрической анизотропией механических свойств, увеличение коэффициента анизотропии R_x и одновременное уменьшение коэффициента R_y приводит к снижению значения h_0/s_0 по сравнению с материалом, имеющим меньшее значение коэффициента анизотропии R_x и большее значение коэффициента анизотропии R_y . Аналогично для материала, имеющего большее значение коэффициента анизотропии R_x и одновременно меньшее значение коэффициента анизотропии R_y , характерно более плавное снижение значения h_0/s_0 с увеличением степени деформации ε_x .

Установлено влияние нормальной анизотропии механических свойств исходной трубной заготовки на устойчивость в виде образования складок.

На рисунках 5.5 и 5.6 приведены графические зависимости изменения величины h_0/s_0 от степени деформации ε_x : для первого материала $\sigma_{i0} = 377,15 \text{ МПа}$; $A = 488,9 \text{ МПа}$; $n = 0,48$; для второго материала $\sigma_{i0} = 194,19 \text{ МПа}$; $A = 275,11 \text{ МПа}$; $n = 0,256$. При следующих размерах трубных заготовок $R_{\text{н}\delta} = 50 \text{ мм}$, $s_0 = 4 \text{ мм}$.

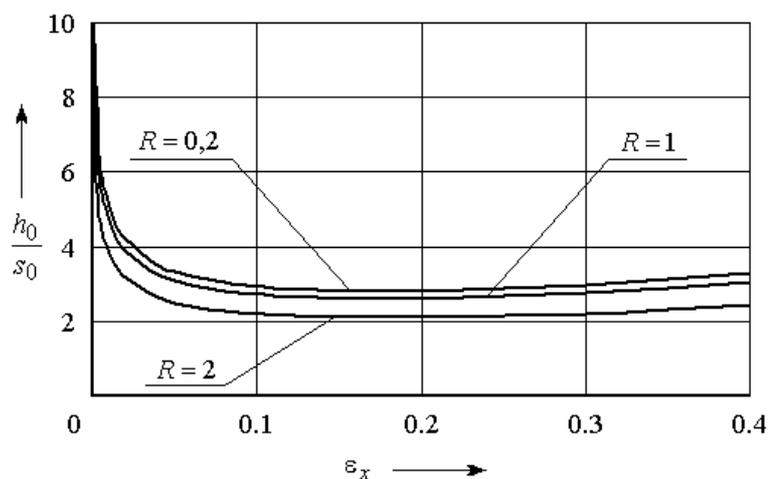


Рисунок 5.5. Зависимость величины h_0/s_0 от ε_x и R для материала 1

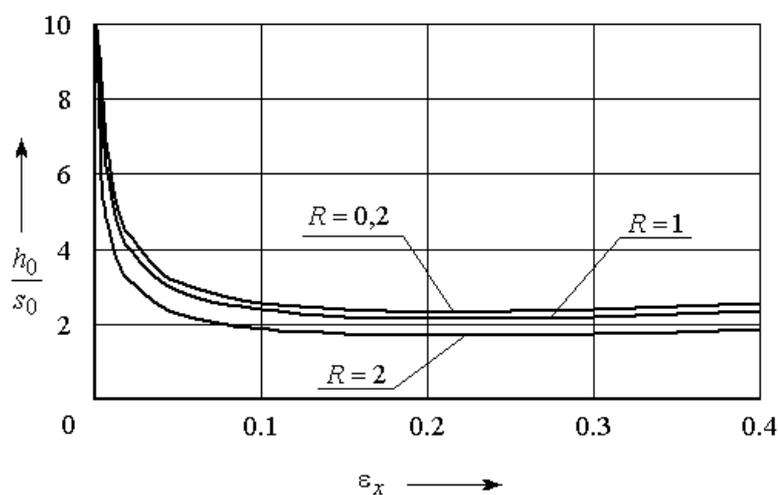


Рисунок 5.6. Зависимость величины h_0/s_0 от ε_x и R для материала 2

Анализ графических зависимостей (см. рисунки 5.5 и 5.6) показывает, что снижение коэффициента нормальной анизотропии R приводит к более устойчивому протеканию процесса осадки трубной заготовки.

6. Условие пластической потери устойчивости в виде горообразования (волнистости) прямоугольной пластины из кристаллического анизотропного материала в условиях плоского напряженного состояния

Возможности обработки давлением тонколистовых материалов при наличии сжимающих напряжений (на сжатых и сжаторастянутых участках листовой заготовки) часто ограничиваются потерей устойчивости заготовки в виде гофров (волнистости). Листовые материалы, получаемые прокаткой, как правило, обладают начальной анизотропией, т.е. направленностью механических свойств в пластическом состоянии – ортотропию, характеризуемую главными осями анизотропии, первая из которых совпадает с направлением прокатки, вторая направлена поперек прокатки, а третья перпендикулярна плоскости листа.

Анизотропия может оказывать существенное влияние на формообразование листового материала.

Вопросы исследования явления потери устойчивости в виде волнистости анизотропных материалов мало изучены. Рассматриваем энергетический метод исследования потери устойчивости. Сущность этого метода состоит в следующем: определяется изменение полной потенциальной энергии плоской листовой заготовки, нагруженной силами, лежащими в ее плоскости, после перехода из плоской формы равновесия в криволинейную, которая равна

$$\Delta \bar{I} = \Delta U_0 + U_1 + U_2, \quad (6.1)$$

где ΔU_0 - изменение потенциальной энергии деформации срединной плоскости листовой заготовки при выпучивании; U_1 - потенциальная энергия деформации изгиба и кручения пластины; U_2 - изменение потенциала внешних сил, приложенных к пластине.

Потенциальной энергией деформации пластины поперечными силами Q_{xz} и Q_{yz} пренебрегаем по ее малости.

В развитии теории устойчивости пластин значительным этапом явились работы С.П. Тимошенко. Применение энергетического критерия устойчивости позволи-

ло успешно рассмотреть ряд задач, непосредственно относящихся к устойчивости стенок в металлических конструкциях. Некоторые задачи подобного рода возникли и решены, в частности из практики судостроения, И.Г. Бубновым и независимо от него Б.Б. Галеркиным. Теория устойчивости пластин при наличии пластических деформаций разработана А.А. Ильюшиным. Он показал, что методами теории упругости можно решать задачи потери устойчивости оболочек при напряжениях, превышающих предел текучести с введением в уравнение теории упругости соответствующие характеристики пластичности материала.

Экстремум выражения (6.1) позволяет рассчитать нагрузку, при которой, наряду с плоской формой равновесия пластины, возникает новая криволинейная форма равновесия, так как общим признаком равновесия материальной системы является экстремальность полной потенциальной энергии Π системы. Полная потенциальная энергия равна

$$\Pi = \Pi_0 + \Delta\Pi,$$

где Π_0 - потенциальная энергия пластины до выпучивания (к выпучиванию не имеет отношение).

6.1. Условие пластичности анизотропного материала

При решении технологических задач по формообразованию листового анизотропного материала обычно исходят из следующих предположений: листовой металл пластически ортотропен; приобретенная анизотропия в процессе пластического формообразования мала по сравнению с начальной анизотропией; материал заготовки несжимаем; упрочнение материала изотропно; эффект Баушингера отсутствует. В главных осях анизотропии условие пластичности Р. Хилла и ассоциированный закон пластического течения имеют вид:

$$F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (6.2)$$

и

$$\begin{aligned}
d\varepsilon_x &= d\lambda [H(\sigma_x - \sigma_y) + G(\sigma_x - \sigma_z)]; & d\gamma_{yz} &= d\lambda L \tau_{yz}; \\
d\varepsilon_y &= d\lambda [F(\sigma_y - \sigma_z) + H(\sigma_y - \sigma_x)]; & d\gamma_{zx} &= d\lambda M \tau_{zx}; \\
d\varepsilon_z &= d\lambda [G(\sigma_z - \sigma_x) + F(\sigma_z - \sigma_y)]; & d\gamma_{xy} &= d\lambda N \tau_{xy}.
\end{aligned} \tag{6.3}$$

В соотношениях (6.2) и (6.3) $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и $\tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}$ - нормальное и касательное напряжения в системе координат xyz ; $d\varepsilon_x, d\varepsilon_y, d\varepsilon_z$ и $d\gamma_{yz}, d\gamma_{zx}, d\gamma_{xy}$ - соответствующие приращения тензора деформаций удлинения и сдвига; F, G, H, L, M, N - параметры анизотропии; $d\lambda$ - коэффициент пропорциональности.

Для плоского напряженного состояния, что характерно для операций листовой штамповки, ($\sigma_z = 0, \tau_{yz} = 0, \tau_{zx} = 0$) условие пластичности (6.2) упрощается:

$$(G + H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H + F)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1. \tag{6.4}$$

Соответственно упрощаются и зависимости (6.3):

$$\begin{aligned}
d\varepsilon_x &= d\lambda [(H + G)\sigma_x - H\sigma_y]; \\
d\varepsilon_y &= d\lambda [-H\sigma_x + (H + F)\sigma_y]; \\
d\gamma_{xy} &= d\lambda N \tau_{xy}.
\end{aligned} \tag{6.5}$$

Обозначим $R_x = H/G; R_y = H/F; R_{xy} = H/N$. (6.6)

Величины R_x, R_y, R_{xy} называются коэффициентами анизотропии по осям x, y и в плоскости xy .

Из условия пластичности (6.2) получим соотношение

$$\begin{aligned}
F &= \frac{1}{\sigma_{sy}^2 (1 + R_y)}; & G &= \frac{1}{\sigma_{sx}^2 (1 + R_x)}; & F + G &= \frac{1}{\sigma_{sz}^2}; \\
H &= \frac{R_y}{\sigma_{sy} (1 + R_y)} = \frac{R_x}{\sigma_{sx}^2 (1 + R_x)}; & 2N &= \frac{1}{\tau_s^2},
\end{aligned} \tag{6.7}$$

где $\sigma_{sx}, \sigma_{sy}, \sigma_{sz}$ - пределы текучести при одноосном растяжении (сжатии) в направлениях главных осей анизотропии x, y, z ; τ_s - предел текучести при сдвиге в плоскости xy . Из соотношений (6.7) получим

$$\frac{\sigma_{sx}}{\sigma_{sy}} = \sqrt{\frac{1+R_y}{R_y/R_x + R_y}}; \quad \sigma_{sz} = \sqrt{\frac{(1+R_x)(1+R_y)}{(1/\sigma_{sx}^2)(1+R_y) + (1/\sigma_{sy}^2)(1+R_x)}}. \quad (6.8)$$

Запишем соотношения (6.5) в более компактном виде, следуя работам [1, 5], учтя, что в случае пренебрежения анизотропии эти соотношения должны переходить в соответствующие зависимости для изотропного тела, принимая коэффициент пропорциональности в виде

$$\psi = \mu \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i}; \quad *$$

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_x &= \mu \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} (c_{11} \sigma_x + c_{12} \sigma_y), \\ d\varepsilon_y &= \mu \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} (c_{12} \sigma_x + c_{22} \sigma_y), \\ d\gamma_{xy} &= \mu \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} c_{33} \tau_{xy}, \end{aligned} \right\} \quad (6.9)$$

где

$$\begin{aligned} c_{11} &= 1 + 1/R_x; \quad c_{12} = -1; \quad c_{22} = 1 + 1/R_y \\ c_{33} &= 2/R_{xy}; \quad \mu = \frac{3}{2(1 + 1/R_x + 1/R_y)}. \end{aligned} \quad (6.10)$$

Заметим, что приращение удельной работы пластической деформации анизотропного материала на единицу объема равно

$$\sigma_x d\varepsilon_x + \sigma_y d\varepsilon_y + \tau_{xy} d\gamma_{xy} = \sigma_i d\varepsilon_i. \quad (6.11)$$

Учтем зависимости (6.9) и получим выражения для интенсивности напряжений анизотропного материала

$$\begin{aligned} &\mu \sigma_x \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} (c_{11} \sigma_x + c_{12} \sigma_y) + \mu \sigma_y \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} (c_{12} \sigma_x + c_{22} \sigma_y) + \\ &+ \mu \tau_{xy} \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} c_{33} \tau_{xy} = \mu \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} (c_{11} \sigma_x^2 + c_{12} \sigma_x \sigma_y + \sigma_x \sigma_y c_{12} + \\ &+ c_{22} \sigma_y^2 + c_{33} \tau_{xy}^2) = \sigma_i d\varepsilon_i. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что

$$\sigma_i = \sqrt{\mu(c_{11} \sigma_x^2 + 2c_{12} \sigma_x \sigma_y + c_{22} \sigma_y^2 + c_{33} \tau_{xy}^2)}. \quad (6.12)$$

Решив зависимости (6.9) относительно напряжений, аналогично найдем выражение для интенсивности приращения деформаций.

Запишем выражения (6.9) в виде

$$\left. \begin{aligned} c_{11} \sigma_x + c_{12} \sigma_y &= \frac{1}{\mu} \frac{\sigma_i}{d\varepsilon_i} d\varepsilon_x; \\ c_{12} \sigma_x + c_{22} \sigma_y &= \frac{1}{\mu} \frac{\sigma_i}{d\varepsilon_i} d\varepsilon_y; \\ c_3 \tau_{xy} &= \frac{1}{\mu} \frac{\sigma_i}{d\varepsilon_i} d\gamma_{xy}. \end{aligned} \right\}$$

Разрешим первые два уравнения относительно σ_x, σ_y :

$$\sigma_x = \frac{\frac{1}{\mu} \frac{\sigma_i}{d\varepsilon_i} \begin{vmatrix} d\varepsilon_x & c_{12} \\ d\varepsilon_y & c_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{12} & c_{22} \end{vmatrix}} = \frac{1}{\mu} \frac{\sigma_i}{d\varepsilon_i} \frac{d\varepsilon_x c_{22} - c_{12} d\varepsilon_y}{c_{11} c_{22} - c_{12}^2},$$

$$\sigma_y = \frac{1}{\mu} \frac{\sigma_i}{d\varepsilon_i} \frac{\begin{vmatrix} c_{11} & d\varepsilon_x \\ c_{12} & d\varepsilon_y \end{vmatrix}}{c_{11} c_{22} - c_{12}^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\sigma_i}{d\varepsilon_i} \frac{d\varepsilon_y c_{11} - c_{12} d\varepsilon_x}{c_{11} c_{22} - c_{12}^2}.$$

Третье уравнение разрешается относительно τ_{xy}

$$\tau_{xy} = \frac{1}{\mu} \frac{\sigma_i}{d\varepsilon_i} \frac{1}{c_3} d\gamma_{xy}.$$

Составим выражение (6.11)

$$\begin{aligned} \sigma_x d\varepsilon_x + \sigma_y d\varepsilon_y + \tau_{xy} d\gamma_{xy} &= \frac{1}{\mu} \frac{\sigma_i}{d\varepsilon_i} \frac{1}{c_{11} c_{22} - c_{12}^2} \times \\ &\times (c_{22} d\varepsilon_x^2 - c_{12} d\varepsilon_x d\varepsilon_y + c_{11} d\varepsilon_y^2 - c_{12} d\varepsilon_x d\varepsilon_y) + \frac{1}{\mu} \frac{\sigma_i}{d\varepsilon_i} \frac{1}{c_3} d\gamma_{xy}^2 = \sigma_i d\varepsilon_i. \end{aligned}$$

Из которого следует

$$d\varepsilon_i = \sqrt{\frac{1}{\mu} \left[\frac{1}{g} (c_{22} d\varepsilon_x^2 - 2c_{12} d\varepsilon_x d\varepsilon_y + c_{11} d\varepsilon_y^2) + \frac{1}{c_3} d\gamma_{xy}^2 \right]}. \quad (6.13)$$

где

$$g = c_{11}c_{22} - c_{12}^2. \quad (6.14)$$

При простом нагружении параметры F, G, H, N являются постоянными или изменяются пропорционально в случае изотропного упрочнения и тогда отношение коэффициентов анизотропии R_x, R_y, R_{xy} остаются постоянными величинами.

В результате интегрирования зависимостей (6.9) получим соотношения между деформациями $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ и напряжениями для пластически ортотропного материала в главных осях анизотропии x, y, z :

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \mu \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} (c_{11}\sigma_x + c_{12}\sigma_y), \\ \varepsilon_y &= \mu \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} (c_{12}\sigma_x + c_{22}\sigma_y), \\ \gamma_{xy} &= \mu \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} c_{33} \tau_{xy}. \end{aligned} \right\} \quad (6.15)$$

Здесь ε_i - интенсивность деформаций анизотропного материала равна согласно выражению (6.13)

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{1}{\mu} \left[\frac{1}{g} (c_{22}\varepsilon_x^2 - 2c_{12}\varepsilon_x\varepsilon_y + c_{11}\varepsilon_y^2) + \frac{1}{c_3} d\gamma_{xy}^2 \right]}. \quad (6.16)$$

а величины $\sigma_i, \mu, g, c_{11}, c_{22}, c_{12}, c_{33}$ определяются по формулам (6.12), (6.10), (6.14).

Решая зависимости (6.15) относительно напряжений, получим

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1}{\mu g} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (c_{22}\varepsilon_x - c_{12}\varepsilon_y), \\ \sigma_y &= \frac{1}{\mu g} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (c_{11}\varepsilon_y - c_{12}\varepsilon_x), \\ \tau_{xy} &= \frac{1}{\mu g} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \gamma_{xy}. \end{aligned} \right\} \quad (6.17)$$

В главных осях напряжений, положение которых определяется углом α , связанным с ориентацией главной оси напряжения и с осью главной оси анизотропии x и равным $0; \alpha'; \pi/2$, зависимости (6.15) с учетом формул (6.19) и условия несжимаемости ($\varepsilon_u + \varepsilon_v + \varepsilon_z = 0$) принимают вид

$$\begin{aligned}\varepsilon_u &= \mu \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} (c'_{12} \sigma_u + c'_{12} \sigma_v); \\ \varepsilon_v &= \mu \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} (c'_{12} \sigma_u + c'_{22} \sigma_v); \\ -\varepsilon_z &= \mu \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} [(c'_{11} + c'_{12}) \sigma_u + (c'_{12} + c'_{22}) \sigma_v],\end{aligned}\tag{6.18}$$

где $\varepsilon_u, \varepsilon_v$ и ε_z - главные деформации удлинения (укорочения) по осям u, v - в плоскости листа и по оси z по толщине листа.

Отметим, что при указанных выше углах направления действия главных напряжений совпадает с направлением главных осей деформаций

Угол α' рассчитывается по формуле

$$\operatorname{tg}^2 \alpha' = \frac{\left(\frac{1}{R_{xy}} - \frac{1}{R_x} - 2 \right) - \frac{\sigma_v}{\sigma_u} \left(\frac{1}{R_{xy}} - \frac{1}{R_y} - 2 \right)}{\left(\frac{1}{R_{xy}} - \frac{1}{R_y} - 2 \right) - \frac{\sigma_v}{\sigma_u} \left(\frac{1}{R_{xy}} - \frac{1}{R_x} - 2 \right)}.$$

Константы $\tilde{n}'_{11}, \tilde{n}'_{22}, \tilde{n}'_{12}, \tilde{n}'_{33}$ определяются по формулам преобразования

$$\left. \begin{aligned}c'_{11} &= c_{11} \cos^4 \alpha + (2c_{12} + c_{33}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + c_{22} \sin^4 \alpha; \\ c'_{12} &= c_{12} + (\tilde{n}'_{11} + \tilde{n}'_{22} - 2c_{12} - c_{33}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha; \\ c'_{22} &= c_{22} \cos^4 \alpha + (2c_{12} + c_{33}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + c_{11} \sin^4 \alpha; \\ c'_{33} &= c_{33} + 4(\tilde{n}'_{11} + \tilde{n}'_{22} - 2c_{12} - c_{33}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha.\end{aligned}\right\}\tag{6.19}$$

Решая зависимости (6.13) относительно напряжений получим

$$\begin{aligned}\sigma_u &= \frac{1}{\mu g'} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (c'_{22} \varepsilon_u - c'_{12} \varepsilon_v) \\ \sigma_v &= \frac{1}{\mu g'} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (c'_{11} \varepsilon_v - c'_{12} \varepsilon_u)\end{aligned}\tag{6.20}$$

где

$$g' = c'_{11} c'_{22} - c'^2_{12}.\tag{6.21}$$

В зависимостях (6.18) и (6.20) интенсивности напряжений и деформаций выражаются формулами

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= \sqrt{\mu(c'_{11}\sigma_u^2 + 2c'_{12}\sigma_u\sigma_v + c'_{22}\sigma_v^2)}; \\ \varepsilon &= \sqrt{(1/\mu g')(c'_{22}\sigma_u^2 - 2c'_{12}\varepsilon_u\varepsilon_v + c'_{11}\varepsilon_v^2)}. \end{aligned} \right\} \quad (6.22)$$

Из зависимостей (6.18) следует соотношение

$$\frac{\varepsilon_u}{c'_{11} + c'_{12} m_\sigma} = \frac{\varepsilon_v}{c'_{12} + c'_{22} m_\sigma}. \quad (6.23)$$

Здесь

$$m_\sigma = \sigma_v / \sigma_u. \quad (6.24)$$

Принимая во внимание соотношения (6.24) и (6.22) найдем

$$\sigma_i = \sqrt{\mu k_\sigma} \sigma_u. \quad (6.25)$$

$$\varepsilon_i = \frac{1}{c'_{11} + c'_{12} m_\sigma} \sqrt{\frac{1}{\mu} k_\sigma} \varepsilon_u, \quad (6.26)$$

где

$$k_\sigma = c'_{11} + 2c'_{12} + c'_{22} m_\sigma^2. \quad (6.27)$$

Из выражений (6.25), (6.26) и (6.23) следуют формулы для главных деформаций

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_u &= \frac{c'_{11} + c'_{12} m_\sigma}{\sqrt{(1/\mu)k_\sigma}} \varepsilon_i; \\ \varepsilon_v &= \frac{c'_{12} + 2c'_{22} m_\sigma}{\sqrt{(1/\mu)k_\sigma}} \varepsilon_i. \end{aligned} \right\} \quad (6.28)$$

В случае, когда $\sigma_z \neq 0$, т.е. для трехосного напряженного состояния, будем иметь аналогичные соотношения

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_u &= \mu \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} [c'_{11}\sigma_u + c'_{12}\sigma_v - (c'_{11} + c'_{12})\sigma_z]; \\ \varepsilon_v &= \mu \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} [c'_{12}\sigma_u + c'_{22}\sigma_v - (c'_{22} + c'_{12})\sigma_z]; \\ \varepsilon_z &= \mu \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} [-(c'_{11} + c'_{12})\sigma_u - (c'_{22} + c'_{12})\sigma_v + (c'_{11} + c'_{22} + 2c'_{12})\sigma_z] \end{aligned} \right\} \quad (6.29)$$

где

$$\sigma_i = \sqrt{\mu \left[(c'_{22} + c'_{12})(\sigma_v - \sigma_z)^2 + (c'_{11} + c'_{12})(\sigma_z - \sigma_u)^2 - c'_{12}(\sigma_u - \sigma_v)^2 \right]}. \quad (6.30)$$

Полагая в формулах (6.23'), (6.25), (6.26) и (6.27) $R_x = R_y = 1$ получим выражения для интенсивности напряжений σ_i и деформаций ε_i

$$\sigma_i = \sqrt{k_\sigma} \sigma_u; \quad (6.31)$$

$$\varepsilon_i = \frac{2}{2 - m_\sigma} \sqrt{k_\sigma} \sigma_u, \quad (6.32)$$

где

$$k_\sigma = 1 - m_\sigma + m_\sigma^2, \quad (6.33)$$

и соотношение

$$\frac{\varepsilon_u}{2 - m_\sigma} = \frac{\varepsilon_v}{2m_{\sigma-1}}, \quad (6.34)$$

справедливые при изотропном материале.

6.2. Схема выпучивания элемента листа

Пусть прямоугольный элемент листа подвергается возрастающей внешней сжимаемой нагрузке, приложенной в его плоскости. До тех пор, пока параметр нагрузки w возрастая остается меньше некоторого критического значения w'_k , возможна только одна форма движения (равновесия) элемента – равномерное сжатие с сохранением его исходной формы. При $w > w'$ происходит бифуркация, т.е. разветвление форм движения, после чего становятся возможными две формы движения – или равномерное сжатие или изгибание (выпучивание). Возникновению выпучивания способствуют малое начальное искривление срединной поверхности элемента листовой заготовки или эксцентриситет при приложении сжимающих сил. Однако после этого элемент не теряет несущей способности и по мере роста нагрузки продолжает постепенно изгибаться. Только после достижения параметром нагрузки определенного значения $w''_k > w'_k$ наблюдается резкое увеличение изгиба и потеря несущей способности элемента. Критический параметр w' , соответствующий началу

выпучивания, определяется касательным модулем, а критический параметр нагрузки w'' , соответствует потере несущей способности – приведенным модулем. После начала изгиба с выпуклой стороны возникает упругая разгрузка. Протяженность по толщине листа зона разгрузки возникает с увеличением сжимающей нагрузки. При достижении параметра нагрузки близкого w'' зона разгрузки по толщине листа составляет порядка $(0,02...0,03)t$. Поэтому упругой зоной разгрузки можно пренебречь и считать, что происходит пластическое выпучивание элемента листовой заготовки.

6.3. Работа внутренних сил при выпучивании анизотропной пластины (потенциальная энергия деформации изгиба и кручения)

Пусть перед потерей устойчивости в элементе возникает однородное плоское пластическое напряженное состояние $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$ и выполняется условие простого нагружения.

Предполагается, что изгиб, сопровождающий выпучивание, незначителен и происходит без возникновения зоны разгрузки. Тогда можно считать, что при выпучивании нагружение остается близким к простому и всюду в элементе справедливы зависимости

$$\varepsilon_x = \varphi s_x; \varepsilon_y = \varphi s_y; \gamma_{xy} = \varphi s_{xy}, \quad (6.37)$$

где

$$\varphi = \mu \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i};$$

$$s_x = c_{11} \sigma_x + c_{12} \sigma_y; \quad s_y = c_{12} \sigma_x + c_{22} \sigma_y; \quad s_{xy} = c_{33} \tau_{xy}. \quad (6.37')$$

Разрешая соотношения (6.37') относительно напряжений найдем

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1}{g} (c_{22} s_x - c_{12} s_y); \\ \sigma_y &= \frac{1}{g} (c_{11} s_y - c_{12} s_x); \\ \tau_{xy} &= \frac{1}{c_{33}} s_{xy}. \end{aligned} \right\} \quad (6.38)$$

где g определяется по формуле (6.14).

При выпучивании деформации получают бесконечно малые приращения $\delta\varepsilon_x, \delta\varepsilon_y, \delta\gamma_{xy}$. Поскольку предполагается, что выпучивание сопровождается бесконечно малым изгибом без возникновения разгрузки, то нейтральную поверхность элемента можно считать совпадающей с его срединной поверхностью. При этом в первом приближении можно изменением первой квадратной формы срединной поверхности при выпучивании можно пренебречь.

Рассмотрим прямоугольную пластину с постоянной толщиной t , малой по сравнению с размерами сторон a и b . Отнесем ее к координатной системе главных осей анизотропии xuz . Оси x и y расположены в срединной плоскости пластины и направлены соответственно вдоль сторон a и b , ось z направлена по нормали к срединной плоскости. Пусть эта пластина нагружена по краям внешними силами, равномерно распределенными по толщине и отнесенными к единице длины соответствующего края пластины. В сечениях пластины, параллельных плоскости xz и yz имеют место нормальные σ_y, σ_z и касательные τ_{yx}, τ_{xy} напряжения. Эти напряжения равномерно распределены по толщине t пластины; поэтому при приведении внутренних сил к срединной плоскости будут иметь место только нормальные и сдвиговые силы N_x, N_y и τ_{xy}, τ_{yx} , которые определяются следующим образом:

$$N_x = \int_{-t/2}^{+t/2} \sigma_x dz; \quad T_{xy} = \int_{-t/2}^{+t/2} \tau_{xy} dz; \quad (6.35)$$

$$N_y = \int_{-t/2}^{+t/2} \sigma_y dz; \quad T_{yx} = \int_{-t/2}^{+t/2} \tau_{yx} dz. \quad (6.36)$$

На рис. 6.1 представлен элемент пластины в срединной полости с действующими на него силами до потери устойчивости.

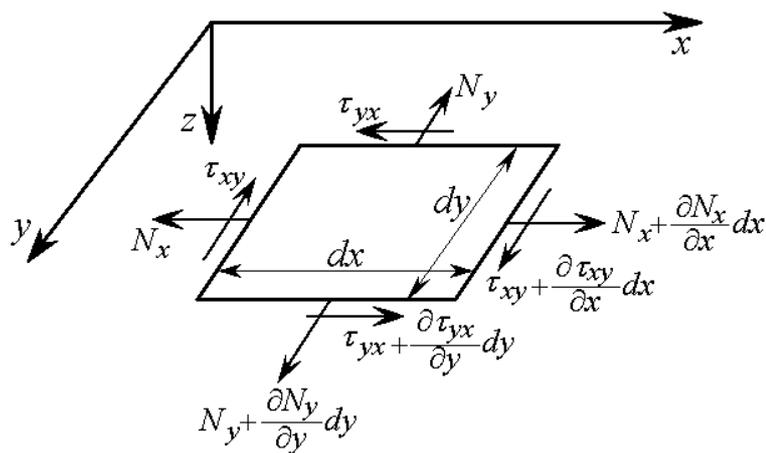


Рисунок 6.1. Силы, действующие на элемент в срединной плоскости пластины до потери устойчивости

При потере устойчивости пластины возникает новая, искривленная форма равновесия пластины. Этой новой форме равновесия соответствуют и новые значения внутренних сил. Наряду с силами N и T , соответствующими деформациям пластин в своей плоскости, возникают и другие внутренние силовые факторы (изгибающие и крутящие моменты и поперечные силы), обусловленные изгибом пластины.

На рис. 6.2 показана схема действия этих внутренних силовых факторов после изгиба срединной поверхности пластины.

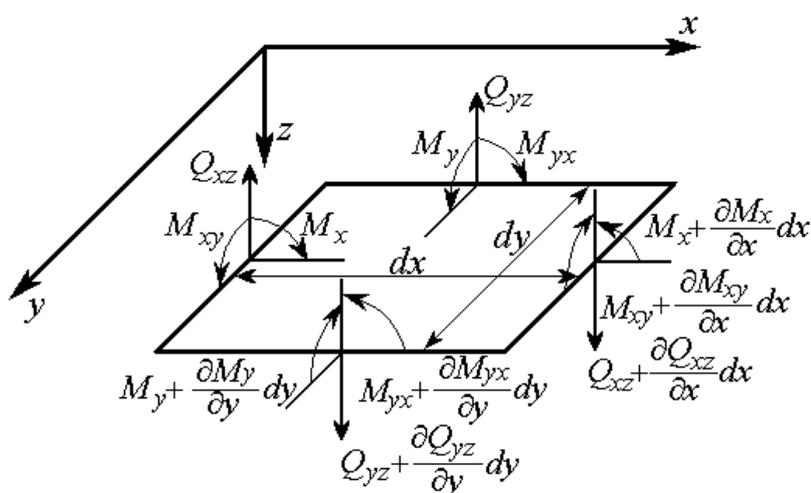


Рисунок 6.2. Схемы действующих силовых факторов на элемент в срединной плоскости пластины после ее изгиба при потере устойчивости

На рис. 6.1 и 6.2 внутренние силовые факторы представлены в предположении, что они положительные

По гипотезе плоских сечений получим

$$\delta\varepsilon_x = z\chi_x, \quad \delta\varepsilon_y = z\chi_y; \quad \delta\gamma_{xy} = 2z\chi_{xy}, \quad (6.39)$$

где z - расстояние точки от срединной поверхности;

$\chi_x, \chi_y, \chi_{xy}$ - приращения кривизны и кручения срединной поверхности элемента листа.

Приращение напряжений $\delta\sigma_x, \delta\sigma_y$ и $\delta\gamma_{xy}$ определим через приращения составляющих S_x, S_y, S_{xy} .

Из зависимости (6.37) имеем

$$s_x = \frac{1}{\varphi} \varepsilon_x.$$

Принимая во внимание выражение для φ из соотношения (6.37), получим

$$\delta s_x = \frac{1}{\varphi} \delta\varepsilon_x + \varepsilon_x \delta\left(\frac{1}{\varphi}\right), \quad (6.40)$$

где

$$\delta\left(\frac{1}{\varphi}\right) = \frac{1}{\mu} \frac{d}{d\varepsilon_i} \left(\frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \right) \delta\varepsilon_i = -\frac{1}{\mu} \frac{1}{\varepsilon_i} \left(\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} - \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} \right) \delta\varepsilon_i.$$

С учетом выражений (6.40), (6.41), (6.42), (6.37)

$$\sigma_e = c\varepsilon_i^n; \quad (6.41)$$

$$E_p = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}, \quad (6.42)$$

где формула (6.41) – кривая упрочнения; E_p - модуль пластичности анизотропного материала, будем иметь

$$\delta s_x = E_p \left[\frac{1}{\mu} \delta\varepsilon_x - \frac{s_x}{\sigma_i} (1-n) \delta\varepsilon_i \right]. \quad (6.43)$$

Приращение интенсивности деформаций следует из формулы (6.16)

$$\delta\varepsilon_i = \frac{1}{2\mu\varepsilon_i} \left\{ \frac{1}{g} \left[2c_{22}\varepsilon_x\delta\varepsilon_x - 2c_{12}(\varepsilon_x\delta\varepsilon_y + \varepsilon_y\delta\varepsilon_x) + 2c_{11}\varepsilon_y\delta\varepsilon_y + \frac{2}{c_{33}}\gamma_{xy}\delta\gamma_{xy} \right] \right\}.$$

После умножения обеих частей равенства на σ_e получим

$$\sigma_i \delta\varepsilon_i = \frac{1}{\varphi} \left\{ \frac{1}{g} \left[(c_{22}\varepsilon_x - c_{12}\varepsilon_y)\delta\varepsilon_x + (c_{11}\varepsilon_y - c_{12}\varepsilon_x)\delta\varepsilon_y \right] + \frac{1}{c_{33}}\gamma_{xy}\delta\gamma_{xy} \right\},$$

или, принимая во внимание зависимости (6.17),

$$\sigma_i \delta\varepsilon_i = \sigma_x\delta\varepsilon_x + \sigma_y\delta\varepsilon_y + \tau_{xy}\delta\gamma_{xy},$$

откуда с учетом равенств (6.39) следует

$$\delta\varepsilon_i = \frac{z}{\sigma_i} \chi; \quad (6.44)$$

где

$$\chi = \sigma_x\chi_x + \sigma_y\chi_y + 2\tau_{xy}\chi_{xy}. \quad (6.45)$$

Из выражения (6.43), учитывая (6.39) и (6.44) получим

$$\delta s_x = E_p \left[\frac{1}{\mu} \chi_x - \frac{s_x}{\sigma_i^2} (1-n) \chi \right] z. \quad (6.46)$$

Аналогичным образом, будем иметь

$$\delta s_y = E_p \left[\frac{1}{\mu} \chi_y - \frac{s_y}{\sigma_i^2} (1-n) \chi \right] z; \quad (6.47)$$

$$\delta s_{xy} = E_p \left[\frac{2}{\mu} \chi_{xy} - \frac{s_{xy}}{\sigma_i^2} (1-n) \chi \right] z. \quad (6.48)$$

Приращениям напряжений соответствуют приращения изгибающих M_x, M_y и крутящего M_{xy} моментов на единицу длины элемента:

$$\left. \begin{aligned} M_x &= \int_{-t/2}^{+t/2} \delta \sigma_x z dz; \\ M_y &= \int_{-t/2}^{+t/2} \delta \sigma_y z dz; \\ M_{xy} &= \int_{-t/2}^{+t/2} \delta \tau_{xy} z dz. \end{aligned} \right\} \quad (6.49)$$

Из первых выражений (6.49) и (6.38) имеем

$$M_x = \frac{1}{g} \int_{-t/2}^{+t/2} (c_{22} \delta s_x - c_{12} \delta s_y) z dz.$$

Учитывая выражения (6.46) и (6.47) после интегрирования получим

$$M_x = E_p I \left[\frac{1}{\mu g} (c_{22} \chi_x - c_{12} \chi_y) - (1-n) \frac{\sigma_x}{\sigma_i^2} \chi \right]. \quad (6.50)$$

Здесь I - момент инерции поперечного сечения шириной, равной единице:

$$I = \frac{t^3}{12}. \quad (6.51)$$

Аналогично будем иметь

$$M_y = E_p I \left[\frac{1}{\mu g} (C_{11} \chi_y - C_{12} \chi_x) - (1-n) \frac{\sigma_y}{\sigma_i^2} \chi \right]. \quad (6.52)$$

$$M_{xy} = E_p I \left[\frac{2}{\mu C_{33}} \chi_{xy} - (1-n) \frac{\tau_{xy}}{\sigma_i^2} \chi \right]. \quad (6.53)$$

Удельная работа деформации, т.е. работа на единицу площади срединной поверхности элемента, совершаемая изгибающими и крутящими моментами при пластическом выпучивании, когда кривизны и кручение получают приращение χ_x , χ_y , χ_{xy} равна

$$W = \int M_x d\chi_x + M_y d\chi_y + 2M_{xy} d\chi_{xy}. \quad (6.54)$$

Подставляя в выражение (6.54) соотношения (6.50-6.53) и интегрируя, получим

$$W = \frac{1}{2} E_{\rho} I \left(\frac{1}{\mu g} (C_{22} \chi_x^2 - 2C_{12} \chi_x \chi_y + C_{11} \chi_y^2) + \frac{4}{\mu C_{33}} \chi_{xy}^2 - (1-n) \frac{\chi^2}{\sigma_i^2} \right). \quad (6.55)$$

Если в формуле (6.55) положить $R_x = R_y = 1$, $R_{xy} = 1/3$, принимая во внимание выражение (6.10) и (6.12), получим формулу удельной работы деформации для изотропного материала:

$$W = \frac{2}{3} E_{\rho} I \left(\chi_x^2 + \chi_x \chi_y + \chi_y^2 + \chi_{xy}^2 - \frac{3}{4} (1-n) \frac{\chi^2}{\sigma_i^2} \right). \quad (6.56)$$

Частные производные от функции (6.55) равны

$$M_x = \frac{\partial W}{\partial \chi_x}; \quad M_y = \frac{\partial W}{\partial \chi_y}; \quad M_{xy} = \frac{1}{2} \frac{\partial W}{\partial \chi_{xy}}. \quad (6.57)$$

Из соотношений (6.50 - 6.56) следует, что приращение изгибающих и крутящих моментов внутренних сил при пластическом выкручивании анизотропного элемента являются однородными линейными функциями приращений кривизны и кручения имеют потенциал W .

Поэтому энергетический метод исследования упругой устойчивости применим и в задачах на пластическое выпучивание анизотропного листа.

Будем считать, что оси u , v - главные оси напряжений и ось u составляет с главной осью анизотропии x угол α .

Рассмотрим прямоугольный элемент анизотропного листа со сторонами, параллельными осям u и v .

В элементе перед вспучиванием возникает пластическое однородное напряженное состояние

$$\sigma_u < 0, \quad \sigma_v \geq 0. \quad (6.58)$$

Заменяя в формуле (6.55) индексы x , y на u и v и принимая во внимание формулы преобразования констант анизотропии (6.19), а также формулы (6.25), (6.26), (6.27), получим выражение для удельной работы изгибающих и крутящих моментов внутренних сил при выпучивании анизотропного элемента в главных осях напряжений u , v , z :

$$W = \frac{1}{2\mu} E_p I \left[\frac{1}{g} (C'_{22} \chi_u^2 - C'_{12} \chi_u \chi_v + C'_{11} \chi_v^2) + \frac{4}{C'_{33}} \chi_{uv}^2 - (1-n) \frac{1}{r_0} \chi^2 \right]. \quad (6.59)$$

где $\chi = \chi_u + \mu_\sigma \chi_v$.

Полная работа деформации, совершенная изгибающим и крутящим моментами внутренних сил по всей площади срединной поверхности пластины будет определяться по выражению:

$$A_1 = U_1 = \int_0^b \int_0^a W dx dy. \quad (6.60)$$

Эта работа равна потенциальной энергии деформации изгиба и кручения пластины U_1 .

В зависимости от выбрано системы координат выражения для удельной работы изгибающих и крутящих моментов внутренних сил при выпучивании анизотропного элемента (потенциальной энергии деформации изгиба и кручения пластины на единицу площади срединной плоскости) W определяют по формуле (6.55), если система координат связана с главными осями напряжений x , y , и по формуле (6.59), если она связана с главными осями напряжений uv и прямоугольные пластины исследуются со сторонами параллельными осям координат.

6.4. Работа внешних сил на контуре элемента пластинки (изменение потенциальной энергии деформации срединной плоскости пластины при выпучивании)

За пределом упругости потеря устойчивости сопровождается деформацией срединной поверхности, на которую затрачивается работа внешних сил на перемещениях контура.

Кроме этой работы контурные силы совершают работу на перемещениях точек контура в плоскости (x, y) за счет выпучивания пластины. Эта совокупная работа A_2 связана с изменением потенциальной энергии деформации срединной плоскости пластину при выпучивании ΔU_0 .

Для вычисления A_2 (ΔU_0) необходимо получить выражение линейных и угловых деформаций срединной плоскости обусловленных ее выпучиванием.

Обозначим составляющие смещения произвольной точки срединной поверхности пластинки в направлениях координатных осей x , y , z через u , v , w . На рис. 6.3 изображено сечение части срединной поверхности плоскостью, параллельной оси x и нормальной к срединной плоскости пластины.

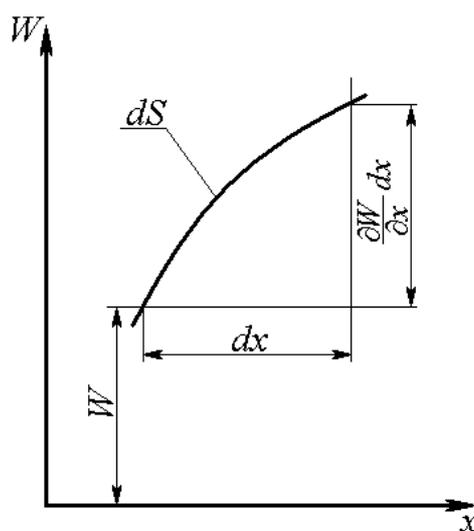


Рисунок 6.3. К вопросу определения линейных деформаций

Учитывая только перемещения W , выражаем длину элемента дуги dS срединной поверхности в виде

$$dS = dx \sqrt{1 + \left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)^2} \approx \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)^2\right] dx. \quad (6.61)$$

Тогда линейная деформация срединной поверхности в направлении оси x , обусловленная перемещениями W равна

$$\frac{dS - dx}{dx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)^2.$$

При одновременном наличии перемещений U и W искомая линейная деформация в направлении оси x будет определяться выражением

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)^2. \quad (6.62)$$

Аналогично линейная деформация срединной поверхности в направлении оси y

$$\varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2. \quad (6.63)$$

Рассмотрим до выпучивания пластины прямоугольный треугольник AOB , расположенный в срединной плоскости пластины так, что его катеты AO и BO соответственно параллельны координатным осям x и y (рис. 6.4).

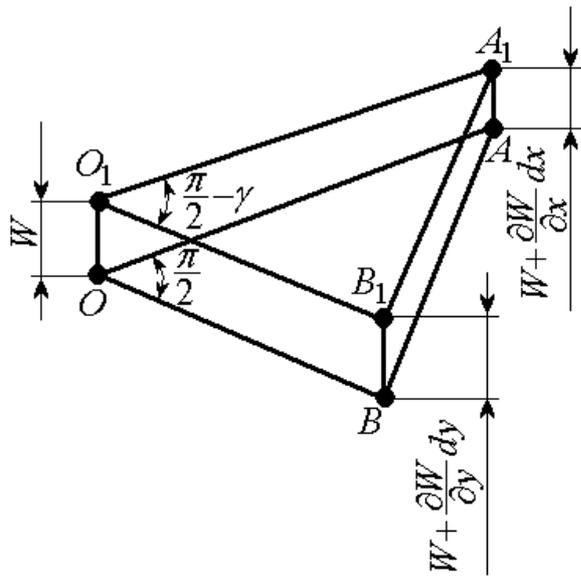


Рисунок 6.4. К вопросу определения угловой деформации.

Длины сторон треугольника:

$$AO = dx; \quad BO = dy; \quad AB = dl = \sqrt{dx^2 + dy^2}.$$

При выпучивании пластины вершина прямого угла O перейдет в положение O_1 , получив перемещение $OO_1 = W$, перпендикулярное к срединной плоскости. Тогда перемещение двух других вершин A и B треугольника AOB будут

$$AA_1 = W + \frac{\partial W}{\partial x} dx; \quad BB_1 = W + \frac{\partial W}{\partial y} dy.$$

Длины сторон треугольника $A_1O_1B_1$, в который перейдет после выпучивания пластины треугольник AOB могут быть выражены следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} O_1A_1 &= \sqrt{(OA)^2 + (AA_1 - OO_1)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)^2} dx \\ O_1B_1 &= \sqrt{(OB)^2 + (BB_1 - OO_1)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial W}{\partial y}\right)^2} dy \\ A_1B_1 &= \sqrt{(AB)^2 + (AA_1 - BB_1)^2} = \sqrt{(dl)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial x} dx - \frac{\partial W}{\partial y} dy\right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (6.64)$$

При выпучивании пластины прямой угол AOB искажается. Изменение этого угла представляет собой угловую деформацию γ срединной поверхности, обусловленную наличием перемещений W .

$$\angle A_1O_1B_1 = \frac{\pi}{2} - \gamma.$$

Применим теорему косинусов к треугольнику $A_1O_1B_1$

$$(A_1B_1)^2 = (O_1A_1)^2 + (O_1B_1)^2 - 2O_1A_1 \cdot O_1B_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right).$$

Использование соотношений (6.64), после преобразований приведет к выражению

$$\frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial W}{\partial y} = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial W}{\partial y}\right)^2} \sin \gamma.$$

Пренебрегая по малости квадратами производных $\frac{\partial W}{\partial x}$ и $\frac{\partial W}{\partial y}$ по сравнению с единицей и заменяя $\sin \gamma$ его аргументом, приходим к следующему выражению для угловой деформации срединной поверхности, зависящей от перемещения W :

$$\gamma = \frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial W}{\partial y} \quad (6.65)$$

При одновременном наличии перемещений u, v, w искомая угловая деформация срединной поверхности

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}. \quad (6.66)$$

Работа A_2 , характеризующая изменение потенциальной энергии деформации срединной плоскости пластины при выпучивании выражается через интенсивности внутренних сил N_x, N_y, T_{xy} и деформации $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ следующим образом:

$$A_2 = \Delta u_0 = \int_0^b \int_0^a [N_x \varepsilon_x + N_y \varepsilon_y + T_{xy} \gamma_{xy}] dx dy$$

и после подстановки значений $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ по формулам (6.62), (6.63) и (6.66) будем иметь

$$\begin{aligned} \Delta u_0 = & \int_0^b \int_0^a \left[N_x \frac{\partial u}{\partial x} + N_y \frac{\partial v}{\partial y} + T_{xy} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] dx dy + \\ & + \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a \left[N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + N_y \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2T_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] dx dy \end{aligned} \quad (6.67)$$

Преобразуем отдельно первый интеграл правой части полученного выражения для Δu_0 . Интегрируя почленно, получаем

$$\begin{aligned} & \int_0^b \int_0^a \left[N_x \frac{\partial u}{\partial x} + N_y \frac{\partial v}{\partial y} + T_{xy} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] dx dy = \\ & = \int_0^b \left[N_x u \Big|_0^a + T_{xy} v \Big|_0^a \right] dy + \int_0^a \left[N_y v \Big|_0^b + T_{xy} u \Big|_0^b \right] dx - \\ & - \int_0^b \int_0^a u \left[\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} \right] dx dy - \int_0^b \int_0^a v \left[\frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} \right] dx dy \end{aligned} \quad (6.68)$$

Два последних интеграла правой части выражения (6.68) обращаются в ноль в силу уравнений равновесия всех сил, действующих на элемент в проекции на оси x и y (рис. 6.1):

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} = 0. \quad (6.69)$$

Первые два интеграла правой части выражения (6.68) представляют собой работу L , произведенную внешними силами, приложенными к контуру пластины и

расположенными в срединной плоскости пластины. Таким образом, выражение (6.67) для изменения потенциальной энергии деформации срединной плоскости при выпучивании можно представить в виде:

$$\Delta u_0 = L + \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a \left[N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + N_y \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2T_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] dx dy. \quad (6.70)$$

Изменение потенциала u_2 внешних сил, приложенных к пластинке, связано с работой L соотношением:

$$u_2 = -L. \quad (6.71)$$

Итак, учитывая зависимости (6.60), (6.70), (6.71) можно представить изменение $\Delta\Pi$ полной потенциальной энергии пластины при ее выпучивании следующим выражением в системе координат x, y главных осей анизотропии (6.1):

$$\begin{aligned} \Delta\Pi = \frac{1}{2} E_p J \int_0^b \int_0^a \left[\frac{1}{\mu g} (C_{22} \chi_x^2 - 2C_{12} \chi_x \chi_y + C_{11} \chi_y^2) + \frac{4}{\mu C_{33}} \chi_{xy}^2 - (1-n) \frac{\chi^2}{\sigma_i^2} \right] \times \\ \times dx dy + \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a \left[N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + N_y \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2T_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] dx dy, \end{aligned} \quad (6.72)$$

$$\text{где } \chi_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad \chi_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \quad \chi_{xy} = -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y};$$

$$\chi = \sigma_x \chi_x + \sigma_y \chi_y + 2\tau_{xy} \chi_{xy}.$$

В системе координат u, v главных осей напряжений

$$\begin{aligned} \Delta\Pi = \frac{1}{2\mu} E_p J \int_0^b \int_0^a \left[\frac{1}{g} (C'_{22} \chi_u^2 - 2C'_{12} \chi_u \chi_v + C'_{11} \chi_v^2) + \frac{4}{C'_{33}} \chi_{uv}^2 - \frac{(1-n)}{K_\sigma} \chi^2 \right] \times \\ \times dx dy + \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a \left[N_u \left(\frac{\partial w}{\partial u} \right)^2 + N_v \left(\frac{\partial w}{\partial v} \right)^2 \right] du dv, \end{aligned} \quad (6.73)$$

$$\text{где } \chi_u = -\frac{\partial^2 w}{\partial u^2}; \quad \chi_v = -\frac{\partial^2 w}{\partial v^2}; \quad \chi = \sigma_u \chi_u + \sigma_v \chi_v.$$

Для вычисления $\Delta\Pi$ задаемся уравнением срединной поверхности выпучившейся пластины в виде одного или нескольких членов ряда

$$w = \sum_{n=1}^{m=k} \bar{C}_n f_n(x, y), \quad (6.74)$$

где $f_n(x, y)$ - функции, удовлетворяющие каждая в отдельности, геометрическими (граничными) условиями, налагаемыми на срединную поверхность пластины устройством ее опор. Желательно, но совершенно не обязательно, чтобы совокупность взятых членов ряда удовлетворяла также и условиям силового типа, т.е. отсутствию моментов и сил по тем или иным краям пластины.

Сформулируем граничные условия закрепления сторон пластины.

1. Защемленный край. В этом случае для всех участков защемления прогиб

$w = 0$; ; угол поворота в плоскости перпендикулярной краю $\frac{\partial w}{\partial y} = 0$, где y - расстояние в направлении нормали к защемленному краю.

2. Свободно опертый край. На контуре, как и в предыдущем случае $w = 0$. Кроме того, на контурной боковой поверхности $\sigma_y = 0$. Поскольку на краю $w = 0$,

то $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0$.

3. Свободно висящий край. Можно принять два граничных условия:

$$M_y = 0 \text{ или } \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$$

и

$$Q_y - \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} = 0 \text{ или } \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + \frac{3}{2} \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2}.$$

Подстановка принятого выражения в соотношение (6.72) дает возможность выразить изменение энергии $\Delta\Pi$ выпучившейся пластины в виде квадратичной функции параметров \bar{C}_n ряда (6.74).

Используем полученные результаты для определения нагрузки на пластину, т.е. того значения нагрузки, при котором, наряду с плоской формой равновесия пластины возникает новая криволинейная форма равновесия. Общим признаком равно-

весия материальной системы является экстремальность полной потенциальной энергии Π системы.

В рассматриваемом нами случае равновесия выпучившейся пластины полная потенциальная энергия равна

$$\Pi = \Pi_0 + \Delta P, \quad (6.75)$$

где Π_0 - потенциальная энергия пластины до выпучивания (независящая от параметров C_n) и ΔP - изменение потенциальной энергии при выпучивании, определяемое формулой (6.72).

Из условия экстремума энергии Π следуют уравнения

$$\frac{\partial \Pi}{\partial C_1} = 0; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial C_2} = 0; \dots; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial C_k} = 0, \quad (6.76)$$

которые являются, в сущности, уравнениями равновесия. Полученная система линейных однородных уравнений (6.76) относительно параметров C_1, C_2, \dots, C_k имеет нулевые решения $C_1 = C_2 = \dots = C_k = 0$, которые соответствуют плоской форме равновесия пластины, и отличные от нуля решения, соответствующие равновесию искривленной пластины. Последние возможны только в том случае, если определитель Δ системы (6.77) обращается в ноль. Из условия $\Delta = 0$ и определяется критическое значение нагрузки, при котором становится возможным выпучивание пластины. Если взятые члены ряда (6.74) совпадают с истинным уравнением срединной поверхности пластины (при весьма малых перемещениях), то энергетический метод дает точное значение критической нагрузки. В противном случае, что практически и имеет место, энергетический метод приводит к критической нагрузке, несколько превышающей ее действительное значение. В случае, когда уравнение срединной поверхности пластины аппроксимируется выражением, содержащим только один параметр C , уравнение $\frac{\partial \Pi}{\partial C} = 0$ может быть заменено непосредственным приравнением нулю изменения полной потенциальной энергии, т.е. $\Delta P = 0$.

7. Использование результатов научно-исследовательской работы в учебном процессе

Результаты научно-исследовательской работы использованы при модернизации учебных планов подготовки бакалавров техники и технологии направления 150400 «Технологические машины и оборудование» 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», «Производство технологического оборудования», «Горячая штамповка», «Новые виды горячей и холодной объемной штамповки», «Нагрев и нагревательные устройства» для бакалавров техники и технологии направления 150400 «Технологические машины и оборудование» 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.

Разработан дополнительный раздел «Теоретические основы экспериментальных исследований пластического формоизменения» курса «Теория обработки металлов давлением» в виде новых лекций (8 лекций) (приложение1).

По результатам научных исследований опубликованы два учебных пособия с грифом УМО вузов по политехническому и университетскому образованию:

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.

При выполнении научно-исследовательской работы привлекались студенты в качестве непосредственных исполнителей НИР. Студентами, привлекаемыми к выполнению НИР, получено 8 Диплом лауреатов Всероссийской научно-технической конференции.

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

8.1. 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.).

8.2. 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.

8.3. 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.

8.4. 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. (принята в печать).

38. Панфилова Г.В., Недошивина С.В., Хвостова Е.Ю. Совершенствование технологии многооперационной холодной штамповки остrokонечных цилиндрических деталей из малопластичных сталей // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. №11. (принята в печать).

8.5. 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. (принята в печать).

21. Дудка Д.В., Яковлев С.С. Пластическое формообразование ортотропных кристаллических анизотропных материалов // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения. Тула; ТулГУ, 2010. С. (принята в печать).

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. (принята в печать).

23. Пасынков А.А. Горячая раздача и высадка законцовок трубопроводов // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения. Тула; ТулГУ, 2010. С. (принята в печать).

8.6. 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 орebrенных 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.

8.7. 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.

8.8. Список, полученных патентов в 2010 г.

1. Пат. 2392079 Российская Федерация, МПК⁷ 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.

8.9. 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 (защита состоится 23 ноября 2010 г.).

2. Драбик Андрей Николаевич «Ротационная вытяжка конических деталей из анизотропных заготовок» по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением (защита состоится 23 ноября 2010 г.).

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».

8.10. 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.).

8.11. 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 конференции 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.).

Заключение

Цель выполнения 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.

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

1. Выполнен аналитический обзор современного состояния теории и технологии пластического деформирования кристаллических анизотропных материалов. Установлено, что листовый материал, используемый для процессов ОМД, обладает анизотропией механических свойств. Анизотропия проката является следствием образования текстуры предпочтительной ориентировки кристаллографических осей в зернах обрабатываемого материала, характера распределения и ориентировки фаз дефектов металла и остаточных напряжений, возникающих вследствие неоднородности пластической деформации при прокатке. При деформации зерна и включения приобретают вытянутую форму, которая после отжига переходит в строчечную структуру. В результате этого свойства, в том числе и механические, вдоль и поперек направления прокатки могут резко различаться.

Кристаллографическая текстура во многих случаях является определяющим фактором в создании анизотропии физических свойств металлических материалов. Следовательно, управляя текстурой, можно целенаправленно регулировать анизотропию их свойств, обеспечить оптимальные значения данной физической характе-

ристики в нужном для определенного изделия направлении и т.п. Кроме того, учитывая связь коэффициента пластической анизотропии с упругими характеристиками материала и текстурой, можно создавать оптимальную текстуру, способствующую повышению штампуемости листов из данного материала. Для реализации на практике всех возможностей, связанных с кристаллографической текстурой, надо располагать информацией о закономерностях формирования текстуры в процессе различных обработок материала (пластическая деформация, рекристаллизационный отжиг и др.), а также об основных технологических факторах, влияющих на текстуру.

Величина коэффициента анизотропии для большинства листовых материалов, используемых в процессах пластического деформирования, изменяется в пределах от 0,2 до 3,5. Анизотропия механических свойств заготовок и деталей существенно зависит от предварительной пластической деформации и последующей термической обработки.

Начальная анизотропия механических свойств материала заготовки оказывает существенное влияние на силовые и деформационные параметры процессов пластического деформирования и на качество получаемых изделий. Она может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на процессы деформирования.

Наибольшее распространение при анализе процессов обработки металлов давлением нашла теория течения анизотропного материала Мизеса - Хилла, которая также не позволяет оценить изменение анизотропии механических свойств материала заготовки в процессах пластического деформирования. Анализ экспериментальных исследований убедительно доказывает изменение этих свойств. В многооперационных технологических процессах обработки металлов давлением следует учитывать изменение анизотропии механических свойств при назначении технологических параметров промежуточных и окончательных операций пластического деформирования. Кроме того, технические условия работы изделия часто требуют формировать определенную анизотропию механических свойств деталей.

Мало внимания уделяется в научно-технической литературе исследованиям напряженного и деформированного состояний заготовки, силовых режимов операций многооперационной вытяжки и реверсивной вытяжки ступенчатых осесиммет-

ричных деталей. Предельные возможности деформирования в основном определялись по максимальной величине растягивающего напряжения на выходе из очага пластической деформации. Оценка устойчивого протекания операций многооперационной вытяжки и реверсивной вытяжки осесимметричных ступенчатых деталей по степени ресурса пластичности и критерию локальной потери устойчивости анизотропной заготовки не производилась. Не решен широкий круг вопросов, связанных с проектированием технологических процессов многооперационной вытяжки и реверсивной вытяжки осесимметричных ступенчатых деталей и определением рациональных условий ведения этих процессов, обеспечивающих изготовление изделий заданного качества (величины накопленных микрповреждений и разнотолщинности стенок изготавливаемых деталей). Существующие исследования носят в основном экспериментальный характер.

В научно-технической литературе не решен широкий круг вопросов по влиянию 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 формирования показателей качества изготавливаемых осесимметричных деталей; по влиянию кристаллографической текстуры на коэффициент нормальной пластической анизотропии гексагональных плотноупакованных – металлов, длительности отжига на текстуру листов из гексагональных плотноупакованных – металлов, по установлению закономерностей изменения текстуры кристаллических материалов при многопереходной штамповки-вытяжки полусферических днищ, по влиянию режимов отжига на глубину газонасыщенного слоя полусферических днищ из титанового сплава ПТ-3Вкт, по выявлению влияния структуры и текстуры листового проката титанового сплава ПТ-3кт на характер разрушения в процессе многооперационной вытяжки, по установлению путей управления текстурой и структурой сварных соединений α -сплавов титана.

2. Выполнен выбор и обоснование оптимального варианта направления исследований.

3. Разработан план проведения экспериментальных и теоретических исследований.

4. Разработан вариант теории пластичности кристаллических ортотропных материалов с анизотропным упрочнением, который основан на неоднородном расширении поверхности нагружения в шестимерном пространстве напряжений, связанных с направлениями главных осей анизотропии. Материал принимается несжимаемым, анизотропным, для которого справедливо условие текучести Мизеса - Хилла и ассоциированный закон пластического течения. Допускается, что поверхность текучести не перемещается в пространстве напряжений. В качестве параметров упрочнения используются величина интенсивности деформации ε_j и компоненты тензора деформаций ε_{ij} в главных осях анизотропии x , y и z . Выбор математической модели анизотропного упрочнения ортотропного тела при анализе процессов пластического формоизменения предлагается осуществлять на основе сопоставления экспериментальных и теоретических данных.

5. Предельные возможности деформирования заготовок часто ограничиваются накопленными микрповреждениями, которые оцениваются удельной работой разрушения и предельными степенями деформаций, причем эти величины существенно зависят от ориентации главных осей напряжений по отношению к главным осям анизотропии.

Это обстоятельство позволило сформулировать энергетический и деформационный критерии деформируемости ортотропного анизотропно-упрочняющегося материала в процессах обработки давлением листового материала, которые учитывают кроме влияния относительной величины среднего напряжения σ/σ_i , параметра вида напряженного состояния, а также и ориентацию первой главной оси напряжения относительно главных осей анизотропии x , y , z , а также ускорение процесса накопления повреждаемости под влиянием уже накопленных в материале повреждений.

6. Предельные возможности формоизменения при пластическом деформировании могут также ограничиваться условием локальной потери устойчивости заготовки. Предложены критерии шейкообразования ортотропного анизотропно-упрочняющегося материала при двухосном растяжении листовой заготовки, полученные из условия положительности добавочных нагрузок и положительности работы добавочных нагрузок.

7. Сформулирован критерий потери устойчивости трубной заготовки из кристаллических ортотропных материалов на основе статического критерия устойчивости. Выполнен анализ потери устойчивости трубной заготовки из кристаллических ортотропных материалов. Принимается, что в начальной стадии потери устойчивости при осадке свободно опертой заготовки концы заготовки заземлены. Напряженное и деформированное состояния цилиндрической заготовки до момента потери устойчивости заготовки принимаются приближенно плоскими. Установлено, что с увеличением степени деформации устойчивость заготовки и, следовательно, величина h_0/s_0 уменьшаются и, достигнув минимума, начинают возрастать в связи с увеличением толщины стенки заготовки, упрочнением материала и снижением высоты заготовки. Полученные зависимости справедливы до $h_0/R_{cp} \leq 6$. При больших значениях отношения u заготовки начинают возникать две выпучины на расстоянии от торцов до середины выпучины $l = h/4$. Показано, что чем выше показатель деформационного упрочнения n , тем больше значение h_0/s_0 , и выше устойчивость заготовки.

8. Установлено влияние нормальной и цилиндрической анизотропии механических свойств исходной трубной заготовки на устойчивость к образованию складок. Показано, что для материалов, обладающих цилиндрической анизотропией механических свойств, увеличение коэффициента анизотропии R_x и одновременное уменьшение коэффициента R_y приводит к увеличению значения h_0/s_0 по сравнению с материалом, имеющим меньшее значение коэффициента анизотропии R_x и большее значение коэффициента анизотропии R_y . Уменьшение коэффициента нормальной анизотропии R приводит к более устойчивому протеканию процесса осадки трубной заготовки.

9. Разработано условие пластической потери устойчивости в виде гофрообразования (волнистости) прямоугольной пластины из кристаллических ортотропных материалов в условиях плоского напряженного состояния на основе энергетического метода исследований.

10. Проведены патентные исследования.

11. По результатам научных исследований опубликованы три монографии, опубликованы и подготовлены к опубликованию 38 научных работ в ведущих научных журналах, рекомендуемых ВАК Российской Федерации; 23 статей в межвузовских сборниках научных трудов, а также опубликовано 11 тезисов докладов на международных и Всероссийских научно-технических конференциях. Получен патент на изобретение: Пат. 2392079 Российская Федерация, МПК⁷ В 21 D 22/02. «Способ штамповки тонкостенных полусферических днищ и устройство для его осуществления». Подана заявка на изобретение.

12. По результатам научно-исследовательской работы защищена одна докторская диссертационная работа и две кандидатские диссертационные работы по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением, подготовлена к защите одна докторская диссертационная работа 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».

13. Результаты научно-исследовательской работы использованы при модернизации учебных планов подготовки бакалавров техники и технологии направления 150400 «Технологические машины и оборудование» 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 про-

цессы листовой и объемной штамповки», 15040040 «Высокоскоростные методы обработки металлов давлением».

14. Отдельные результаты исследований использованы в учебном процессе в курсах «Новые технологические процессы и оборудование» и «Механика процессов пластического формоизменения», «Теория обработки металлов давлением», «Производство технологического оборудования», «Горячая штамповка», «Новые виды горячей и холодной объемной штамповки», «Нагрев и нагревательные устройства» для бакалавров техники и технологии направления 150400 «Технологические машины и оборудование» 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.

Разработан дополнительный раздел «Теоретические основы экспериментальных исследований пластического формоизменения» в курс «Теория обработки металлов давлением» в виде новых лекций (8 лекций).

15. При выполнении научно-исследовательской работы привлекались студенты в качестве непосредственных исполнителей НИР. Студентами, привлекаемыми к выполнению НИР, получено 8 Диплом лауреатов Всероссийской 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, 2010 г.). Исполнителями НИР опубликованы 4 научно-методических статей.

16. По результатам научных исследований опубликованы два учебных пособия с грифом УМО вузов по политехническому и университетскому образованию.

17. Члены творческого коллектива удостоены звания лауреата премия имени С.И. Мосина 2010 года в области разработок военной техники, технологии и оборудования, имеющих двойное применение (д.т.н., проф. Яковлев С.С., д.т.н., проф. Трегубов В.И.). Доктору технических наук, профессору Яковлеву С.П. посмертно присвоено Почетное звание «Основатель научной школы» Российской академии естествознания.

Список использованных источников

1. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки: учебн. для вузов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
2. Адамеску Р.А., Гельд П.В., Митюшков Е.А. Анизотропия физических свойств металлов. М.: Metallургия, 1985. 136 с.
3. Арышенский Ю.М., Гречников Ф.В. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов. М.: Metallургия, 1990. 304 с.
4. Ашкенази Е.К. Анизотропия машиностроительных материалов. Л.: Машиностроение, 1969. 112 с.
5. Бакхауз Г. Анизотропия упрочнения. Теория в сопоставлении с экспериментом // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1976. №6. С. 120 - 129.
6. Басовский Л.Е. Прогнозирование повреждаемости деформируемых материалов при немонотонном нагружении // Известия вузов. Машиностроение. 1990. №2. С. 3 - 7.
7. Бастун В.Н. К условию пластичности анизотропных тел // Прикладная механика / АН УССР. Ин-т механика. Киев: Наукова думка. 1977. №1. С. 104 - 109.
8. Баудер У. Глубокая вытяжка пустотелых изделий из толстых листов // Проблемы современной металлургии: сборник сокращенных переводов и обзоров иностранной периодической литературы. М.: Иностранная литература. 1952. №2. С. 93 - 110.
9. Бебрис А.А. Устойчивость заготовки в формообразующих операциях листовой штамповки. Рига: Зинатие, 1978. 125с.
10. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. 329 с.
11. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Metallургия, 1984. 144 с.

12. Быковцев Г.И. О плоской деформации анизотропных идеально-пластических тел // Известия АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. 1963. №2. С. 66 - 74.
13. Бэкофен В. Процессы деформации. М.: Metallurgiya, 1977. 260 с.
14. Валиев С.А. Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов. М.: Машиностроение, 1973. 176 с.
15. Теория образования текстур в металлах и сплавах. Вишняков Я.Д. [и др.]/М: Наука, 1979.
16. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука. 1967. 984 с.
17. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Metallurgiya, 1984. 280 с.
18. Влияние кристаллографической текстуры на коэффициент нормальной пластической анизотропии ГПУ-металлов / Е.Ю. Поликарпов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 1990. № 2. С. 103-108.
19. Ву Э.М. Феноменологические критерии разрушения анизотропных сред // Механика композиционных материалов / Пер. с англ. М.: Мир, 1978. С. 401 - 491.
20. Вытяжка с утонением стенки / И.П. Ренне [и др.]. Тула: ТПИ, 1970. 141 с.
21. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. 428 с.
22. Гельфонд В.Л. Построение математической модели процесса образования разностенности при вытяжке с утонением стенки // Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Тула: ТПИ, 1974. Вып. 35. С. 60-68.
23. Геогджаев В.И. Пластическое плоское деформированное состояние ортотропных сред // Труды МФТИ. 1958. Вып. 1. С. 55 - 68.
24. Геогджаев В.О. Волочение тонкостенных анизотропных труб сквозь коническую матрицу // Прикладная механика. 1968. Т.4. Вып. 2. С. 79 - 83.
25. Головлев В.Д. Расчет процессов листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1974. 136 с.

26. Грдилян Г.Л. Анализ стационарной стадии процесса реверсивной вытяжки цилиндрических стаканов // Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Тула: ТПИ, 1974. Вып. 35. С. 72-78.
27. Грдилян Г.Л. Влияние анизотропии и упрочнения на изменение толщины стенки в процессе реверсивной вытяжки // Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Тула: ТПИ, 1974. Вып. 2. С. 88-97.
28. Грдилян Г.Л. Влияние подпора на напряженно-деформированное состояние при реверсивной вытяжке заготовки из ортотропного упрочняющегося материала // Обработка металлов давлением. Тула: ТПИ, 1974. Вып. 25. С. 45-51.
29. Грдилян Г.Л. Учет упрочнения и анизотропии при анализе стационарной стадии реверсивной вытяжки // Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Тула: ТПИ, 1975. Вып. 2. С. 21-30.
30. Грдилян Г.Л., Басовский Л.Е., Ренне И.П. Использование ресурса пластичности при реверсивной вытяжке // Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Тула: ТПИ, 1977. Вып. 4. С. 18-24.
31. Грдилян Г.Л., Ренне И.П. Свободная реверсивная вытяжка (без матрицы) // Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Тула: ТПИ, 1977. Вып. 4. С. 59-68.
32. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов М.: Машиностроение, 1998. 446 с.
33. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. М.: Металлургия, 1960. Т. 1. 376 с., Т. 2. 416 с., Т. 3. 306 с.
34. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
35. Данилов В.Л. К формулировке закона деформационного упрочнения // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1971. № 6. С. 146 - 150.
36. Дель Г.Д. Технологическая механика. М.: Машиностроение, 1978. 174 с.

37. Демин В.А. Проектирование процессов тонколистовой штамповки на основе прогнозирования технологических отказов. М.: Машиностроение, 2002. 186 с.
38. Джонсон В., Кудо Х. Механика процессов выдавливания металлов. М.: Металлургия, 1965. 197 с.
39. Джонсон У., Меллор П. Теория пластичности для инженеров. М.: Машиностроение, 1979. 567 с.
40. Евдокимов А.К. Холодное выдавливание сложнопрофильных изделий // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2005. № 1. С. 9 – 17.
41. Евдокимов А.К., Назаров А.В. Дифференцированное выдавливание с одновременной вытяжкой // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформированного твердого тела и обработка металлов давлением. 2004. Вып. 3. С. 101 - 106.
42. Евдокимов А.К., Назаров А.В. Учет противодействия при обратном выдавливании с активным трением // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 11. С. 28-35.
43. Евдокимов А.К., Петров Б.В. Механизм образования утяжины в ступенчатой стенке выдавленного стакана // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформированного твердого тела и обработка металлов давлением. 2004. Вып. 3. С. 74 - 81.
44. Евдокимов А.К., Рыбин А.Ю. Комбинированное выдавливание кольцевых заготовок // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. Вып. 1. С. 200 – 208.
45. Евдокимов А.К., Чернова Ю.В. Влияние трения на контактных поверхностях инструмента на силу вытяжки с утонением // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. Вып. 1. С. 206 -214.
46. Егоров М.И. Определение коэффициента поперечных деформаций листового проката с начальной анизотропией на цилиндрических образцах // Заводская лаборатория. 1988. № 11. С. 79 - 82.

47. Ерманок М.З. Прессование труб и профилей специальной формы. Теория и технология. М.: Metallurgy, 1992. 304 с.
48. Жарков В.А. Методика разработки технологических процессов вытяжки с учетом анизотропии листовых материалов // Кузнечно-штамповочное производство. 1994. №10. С. 5 - 9.
49. Жарков В.А. Перспективы экономии металла в листоштамповочном производстве // Кузнечно-штамповочное производство. 1991. №12. С. 7 - 11.
50. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
51. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. Л.: Машиностроение, 1980. 432 с.
52. Ивлев Д.Д., Быковцев Г.И. Теория упрочняющегося пластического тела. М.: Наука, 1971. 232 с.
53. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов / С.П. Яковлев [и др.]. М: Машиностроение, 2004. 427 с.
54. Ильюшин А.А. Пластичность. М.: Изд-во АН СССР. 1963. 207 с.
55. Исследование параметров анизотропии в процессах ротационной вытяжки / А.И. Вальтер [и др.] // Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Тула: ТПИ, 1986. С. 156 - 160.
56. Карпушин Н.И., Тутнов А.А. Определяющие уравнения анизотропной пластичности материалов для математической модели со смещающейся, расширяющейся и разворачивающейся поверхностью текучести // Вопросы атом. науки и техн. Атом. материаловеден. 1988. №1/26. С. 8 - 13.
57. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 312 с.
58. Кибардин Н.А. Исследование пластической анизотропии металла статистическим методом // Заводская лаборатория. 1981. № 9. С. 85 - 89.
59. 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.

60. Колесников Н.П. Зависимость штампуемости стали от анизотропии при вытяжке деталей сложной формы // Кузнечно-штамповочное производство. 1962. № 8. С. 18 - 19.
61. Колесников Н.П. Расчет напряженно-деформированного состояния при вытяжке с учетом анизотропии // Кузнечно-штамповочное производство. 1963. № 9. С. 15 - 19.
62. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет (УПИ), 2001. 836 с.
63. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.
64. Колмогоров В.Л., Мигачев Б.А., Бурдуковский В.Г. Феноменологическая модель накопления повреждений и разрушения при различных условиях нагружения. Екатеринбург: УрОРАМ, 1994. 104 с.
65. Комплексы технологий и научное обеспечение производственных процессов пластического формообразования особо ответственных деталей машиностроения из высокопрочных анизотропных материалов / Е.Ю. Поликарпов [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2008. № 7. С. 18-22.
66. Кудрявцев И.П. Текстуры в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1965. 292 с.
67. Кузин В.Ф. Влияние анизотропии на разностенность при вытяжке с утонением стенки // Обработка металлов давлением. Тула: ТПИ, 1971. С. 171 - 176.
68. Кузин В.Ф., Юдин Л.Г., Ренне И.П. Изменение показателя анизотропии в процессе многооперационной вытяжки с утонением стенки // Прогрессивная технология глубокой вытяжки листовых материалов. Тула: ТПИ, 1968. С. 229 - 234.
69. Лемешев П.В. Производственный опыт разработки прогрессивных техпроцессов штамповки тонколистовых деталей. М.: Изд-во НПО «Энергия», 1983. 60 с.
70. Листовая штамповка: Расчет технологических параметров: справочник / В.И. Ершов [и др.]. М.: Изд-во МАИ, 1999. 516 с.

71. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение. 1975. 400 с.
72. Малинин Н.Н. Технологические задачи пластичности и ползучести. М.: Высшая школа, 1979. 119 с.
73. Малов А.Н. Производство патронов стрелкового оружия. М.: Оборонгиз, 1947. 414 с.
74. Малоотходная, ресурсосберегающая технология штамповки / под ред. В.А. Андрейченко, Л.Г. Юдина, С.П. Яковлева. Кишинев: Universitas. 1993. 240с.
75. Маркин А.А., Яковлев С.С. Влияние вращения главных осей ортотропии на процессы деформирования анизотропных, идеально-пластических материалов // Механика твердого тела. 1996. №1. С. 66 - 69.
76. Маркин А.А., Яковлев С.С., Здор Г.Н. Пластическое деформирование ортотропного анизотропно-упрочняющегося слоя // Вести АН Беларуси. Технические науки. Минск. 1994. №4. С. 3 - 8.
77. Мельников Э.Л. Холодная штамповка днищ. М.: Машиностроение, 1986. 192 с.
78. Микляев П.Г., Фридман Я.Б. Анизотропия механических свойств металлов. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
79. Недорезов В.Е. Глубокая вытяжка листового металла. М., Л.: Машгиз, 1949. 104 с.
80. Неймарк А.С. К вопросу об определении параметров анизотропии ортотропных материалов // Известия вузов СССР. Машиностроение. 1975. № 6. С. 5 - 9.
81. Некоторые пути управления текстурой и структурой сварных соединений α - сплавов титана / Е.Ю. Поликарпов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 1986. № 5. С. 93-96.
82. Нечепуренко Ю.Г. Перспективные технологии изготовления цилиндрических изделий. Тула: ТулГУ, 2001. 263 с.
83. Нечепуренко Ю.Г., Яковлев С.П., Яковлев С.С. Глубокая вытяжка цилиндрических изделий из анизотропного материала. Тула: ТулГУ, 2000. 195 с.

84. Обозов И.П. Анализ процесса свертки с утонением стенки // Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Тула: ТПИ, 1973. Вып. 29. С. 194 - 208.
85. Овчинников А.Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. М.: Машиностроение, 1983. 200 с.
86. Овчинников А.Г., Жарков В.А. Исследование влияния анизотропии на вытяжку листового металла // Известия вузов. Машиностроение. 1979. № 8. С. 94 - 98.
87. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Вища школа, 1983. 175 с.
88. Пилипенко О.В. Обжим и раздача трубных заготовок из анизотропных материалов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. 150 с.
89. Пилипенко О.В. Обжим и раздача трубных заготовок из анизотропных материалов // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 11. С. 22-28.
90. Пилипенко О.В., Яковлев С.С., Трегубов В.И. Вытяжка с утонением стенки цилиндрических деталей из двухслойных анизотропных материалов // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. №1. С. 30-35.
91. Подлесный С.В., Поликарпов Е.Ю. Математическая модель реверсивной вытяжки осесимметричных деталей из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. Вып. 3. С. 232-239.
92. Поликарпов Е.Ю. Взаимосвязь характеристик разрушения полуфабриката в процессе многооперационной вытяжки со структурой и текстурой титанового сплава ПТ-3Вкт // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2007. Вып. 2. С. 21 – 25.
93. Поликарпов Е.Ю. Влияние длительности отжига на текстуру листов из сплава ПТ-3Вкт // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2009. Вып. 2. С. 128-131.
94. Поликарпов Е.Ю. Влияние технологических параметров на неоднород-

ность механических свойств при обратном выдавливании трубных заготовок // Труды международного научного симпозиума «Автостроение 2009». Сек. 6. Машина и технологии заготовительного производства. М.: МГТУ «МАМИ». 2009.

95. Поликарпов Е.Ю. Выдавливание оребрений на плитах // Вестник машиностроения. 2008. № 8. С. 68-71.

96. Поликарпов Е.Ю. Вытяжка с утонением стенки толстостенных цилиндрических заготовок из анизотропных материалов // Вестник машиностроения. 2009. № 7. С. 62-68.

97. Поликарпов Е.Ю. Вытяжка ступенчатых деталей из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформированного твердого тела и обработка металлов давлением. 2004. Вып. 2. С. 86 - 93.

98. Поликарпов Е.Ю. Изменение текстуры полусферических днищ из титанового сплава ПТ-3Вкт в процессе многооперационной вытяжки // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2007. Вып. 2. С. 113 – 118.

99. Поликарпов Е.Ю. Математическое моделирование операции реверсивной вытяжки цилиндрических и осесимметричных деталей из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2009. Вып. 2. С. 144-153.

100. Поликарпов Е.Ю. Многооперационная вытяжка ступенчатых осесимметричных деталей из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. Вып. 1. С. 101 – 108.

101. Поликарпов Е.Ю. Неоднородность механических свойств при обратном выдавливании трубных заготовок // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2009. Вып. 2. Часть 2. С. 82-84.

102. Поликарпов Е.Ю. Новый технологический процесс изготовления толстостенных цилиндрических заготовок // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения. Тула: ТулГУ, 2009. Часть II. С. 22-27.

103. Поликарпов Е.Ю. Обратное выдавливание толстостенных трубных заго-

товок из анизотропных материалов // Заготовительные производства в машиностроении (Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). 2009. №2. С. 20-24.

104. Поликарпов Е.Ю. Особенности процесса реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из анизотропного материала // Материалы третьей научно-технической конференции «Металлофизика, механика материалов, наноструктуры и процессы деформирования Металлдеформ-2009», 2009. Самара: СГАУ. Т2. С.183-192.

105. Поликарпов Е.Ю. Оценка силовых режимов реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из трансверсально-изотропного материала // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2009. Вып. 1. Часть 1. С. 129-136.

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

107. Поликарпов Е.Ю. Реверсивная вытяжка осесимметричных деталей с фланцем из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2008. Вып. 3. С. 3-14.

108. Поликарпов Е.Ю. Реверсивная вытяжка осесимметричных деталей с фланцем из анизотропных материалов // Обработка материалов давлением (Обробка матеріалів тиском): сборник научных трудов. Украина, Краматорск: ДГМА, №2 (21) 2009. С. 161-169.

109. Поликарпов Е.Ю. Связь характеристик анизотропии с кристаллографической текстурой гексагональных плотноупакованных металлов // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2008. Вып. 1. С. 117-124.

110. Поликарпов Е.Ю. Силовые режимы и предельные возможности обратного выдавливания толстостенных трубных заготовок из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2008. Вып. 4. С. 61-69.

111. Поликарпов Е.Ю. Совершенствование технологии холодной штамповки

полусферических тонкостенных днищ // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформированного твердого тела и обработка металлов давлением. 2004. Вып. 3. С. 141 - 147.

112. Поликарпов Е.Ю. Технологические параметры многооперационной вытяжки ступенчатых осесимметричных деталей из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2008. Вып. 1. С. 94-103.

113. Поликарпов Е.Ю. Технологические режимы операции вытяжки с утонением стенки толстостенных заготовок из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2009. Вып.3. С. 93-104.

114. Поликарпов Е.Ю. Технология многооперационной вытяжки полусферических тонкостенных днищ // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2008. Вып. 1. С. 80-87.

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

116. Поликарпов Е.Ю., Подлесный С.В. Влияние анизотропии механических свойств на предельные возможности формоизменения многооперационной вытяжки ступенчатых осесимметричных деталей // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. Вып. 2. С. 171 – 175.

117. Поликарпов Е.Ю., Подлесный С.В. К оценке предельных возможностей операции реверсивной вытяжки осесимметричных деталей из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. Вып. 4. С. 47-53.

118. Поликарпов Е.Ю., Подлесный С.В. Предельные возможности операции реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2007. Вып. 2. С. 185 – 188.

119. Поликарпов Е.Ю., Подлесный С.В. Силовые режимы и предельные воз-

возможности формоизменения многооперационной вытяжки ступенчатых осесимметричных деталей из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. Вып. 2. С. 88-98.

120. Поликарпов Е.Ю., Подлесный С.В. Силовые режимы реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2007. Вып.2. С. 78 – 84.

121. Поликарпов Е.Ю., Чудин В.Н. Вязкопластическое формообразование оребренных панелей // Технология машиностроения, 2009. № 3 (81). С.16-20.

122. Поликарпов Е.Ю., Чудин В.Н. Изотермическое формообразование деталей с утолщениями // Вестник машиностроения. 2008. № 6. С. 60-62.

123. Поликарпов Е.Ю., Чудин В.Н. Оценка критических условий горячей гибки с растяжением // Заготовительные производства в машиностроении (Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). 2008. № 7. С. 28-31.

124. Поликарпов Е.Ю., Чудин В.Н., Нечепуренко Ю.Г. Верхнеграничные оценки параметров вытяжки на радиальной матрице // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. Вып. 2. С. 146 – 149.

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

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

127. 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.

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

129. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.

130. Ренне И.П. Предпосылки теоретического и экспериментального изучения процесса вытяжки с утонением стенки на основе кинематических принципов

плоского течения // Прогрессивная технология глубокой вытяжки листовых материалов. Тула: Приокское книжн. изд-во, 1968. С. 160 - 169.

131. Ренне И.П., Басовский Л.Е. Ресурс пластичности при волочении, вытяжке с утонением и гидропрессовании // Обработка металлов давлением. Свердловск: УПИ. 1977. Вып.4. С. 92 - 95.

132. Ресурс пластичности при вытяжке с утонением / Л.Е. Басовский [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. 1977. № 8. С. 27 - 30 .

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

134. Рузанов Ф.И. Локальная устойчивость процесса деформации ортотропного листового металла в условиях сложного нагружения // Машиноведение / АН СССР. 1979. №4. С. 90 - 95.

135. Рузанов Ф.И. Определение критических деформаций при формообразовании детали из анизотропного листового металла // Машиноведение. 1974. № 2. С. 103 - 107.

136. Сегал В.М. Технологические задачи теории пластичности. Минск: Наука и техника, 1977. 256 с.

137. Селедкин Е.М., Гвоздев А.Е. Математическое моделирование процессов формоизменения заготовок. М.: Академия проблем качества; ТулГУ, 1998. 225 с.

138. Скуднов В.А. Закономерности предельной пластичности металлов // Проблемы прочности. 1982. №9. С. 72 - 80.

139. Смирнов В.С. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1973. 496 с.

140. Смирнов В.С., Дурнев В.Д. Текстуробразование при прокатке. М.: Металлургия, 1971. 254 с.

141. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Л.: Машиностроение, 1978. 368 с.

142. А.с. №227619 СССР. Способ изготовления днищ топливных баков из титановых сплавов/ Е.Ю. Поликарпов [и др.]. (СССР), 1985. 1 с.

143. Способ штамповки тонкостенных полусферических днища и устройство для его осуществления / Е.Ю. Поликарпов [и др.]. Положительное решение на заявку № 2008140592 от 13.10.2008. МПК⁸В21D22/28; В21D51/08.
144. Соколов Л.Д., Скуднов В.А. Закономерности пластичности металлов. М.: ООНТИВИЛС. 1980. 130 с.
145. Соколовский В.В. Теория пластичности. М.: Высшая школа, 1969. 608 с.
146. Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1979. 215 с.
147. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
148. Талыпов Г.Б. Исследование эффекта Баушингера // Известия АН СССР. Механика и машиностроение. 1964. № 6. С. 131 - 137.
149. Талыпов Г.П. Пластичность и прочность стали при сложном нагружении. Л.: Изд-во ЛГУ. 1968. 134 с.
150. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Голенков [и др.]; под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.
151. Теория пластических деформаций металлов / Е.П. Унксов [и др.]; под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1983. 598 с.
152. Технология конструкционных материалов (Технологические процессы в машиностроении): учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов: в 4 ч. Ч. 3. Производство заготовок / С.П. Яковлев [и др.]. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. 582 с.
153. Томилов Ф.Х. Зависимость пластичности металлов от истории деформирования // Обработка металлов давлением. Свердловск: УПИ, 1987. С. 71-74.
154. Томленов А.Д. Пластическое деформирование металлов. М.: Metallurgia, 1972. 408 с.
155. Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш. Механика пластических деформаций при обработке металлов. М.: Машиностроение. 1969. 362 с.

156. Трегубов В.И., Яковлев С.П., Яковлев С.С. Технологические параметры вытяжки с утонением стенки двухслойного упрочняющегося материала // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2005. № 1. С. 29 – 35.
157. Углов А.Л., Гайдученя В.Ф., Соколов П.Д. Оценка деформационной анизотропии механических свойств сплавов акустическим методом // Обработка металлов давлением. Свердловск: УПИ, 1987. С. 34 - 37.
158. Хван Д.В. Технологические испытания металлов. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1992. 152 с.
159. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М.: ГИТТЛ, 1956. 408 с.
160. Цой Д.Н. Волочение тонкостенной трубы через коническую матрицу // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1987. № 4. С. 182 - 184.
161. Цой Д.Н. Предельная степень вытяжки анизотропной листовой заготовки // Известия вузов. Машиностроение. 1986. № 4. С. 121 - 124.
162. Чернова Ю.В., Евдокимов А.К. Ресурс пластичности при вытяжке с утонением в конической матрице // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. Вып. 2. С. 208 – 216.
163. Чудин В.Н., Поликарпов Е.Ю. Выдавливание с осадкой фланцевых утолщений при вязкопластичности // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2009. Вып. 2. С. 99-106.
164. Чудин В.Н., Поликарпов Е.Ю. Верхнеграничные расчеты технологии листовой штамповки // Вестник машиностроения. 2007. № 10. С. 54-57.
165. Чудин В.Н., Поликарпов Е.Ю. Вязкопластическое формообразование оребрений // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. Вып. 4. С. 60-68.
166. Чудин В.Н., Поликарпов Е.Ю. Изгиб с нагревом элементов оболочек // Заготовительные производства в машиностроении (Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). 2008. № 5. С. 17-21.
167. Чудин В.Н., Поликарпов Е.Ю. Энергетические расчеты при вытяжке на

радиальной матрице // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. Вып. 1. С. 280 - 289.

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

169. Шляхин А.Н. Оценка надежности технологических переходов глубокой вытяжки осесимметричных цилиндрических деталей без утонения // Вестник машиностроения. 1995. №4. С. 33 - 36.

170. Шляхин А.Н. Прогнозирование разрушения материала при вытяжке цилиндрических деталей без утонения // Вестник машиностроения. 1995. №5. С. 35 - 37.

171. Шляхин А.Н. Расчет напряжений в опасном сечении при вытяжке без утонения цилиндрических деталей // Кузнечно-штамповочное производство. 1995. №6. С. 8 - 11.

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

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

174. Яковлев С.П., Пилипенко О.В., Безотосный Д.А. Анализ силовых режимов процесса вытяжки с утонением двухслойных анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. Вып. 1. С. 3 – 17.

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

176. Яковлев С.С., Калашников А.Е., Поликарпов Е.Ю. Гофрообразование кольцевой заготовки из анизотропного материала // Материалы Международной научно-технической конференции «Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением». Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. 2009. С. 163-166.

177. Яковлев С.С., Нечепуренко Ю.Г., Суков М.В. Пластическое деформирование ортотропного анизотропно-упрочняющегося материала // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2007. Вып. 2. С. 9 – 14.

178. Яковлев С.С., Пилипенко О.В. Изотермическая вытяжка анизотропных материалов. М.: Изд-во Машиностроение, 2007. 212 с.

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

180. Яковлев С.С., Поликарпов Е.Ю. Теория деформирования анизотропных упрочняющихся материалов // Материалы Международной научно-технической конференции «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов давлением». Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. 2007. С. 139-143.

181. Яковлев С.С., Поликарпов Е.Ю. Технологические параметры процесса реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из анизотропного материала // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. № 2. С.

182. Яковлев С.С., Поликарпов Е.Ю. Формирование разностенности осесимметричных деталей с фланцем при реверсивной вытяжке из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2008. Вып. 4. С. 101-105.

183. Осесимметричное обратное выдавливание анизотропной трубной заготовки / С.С. Яковлев [и др.] // Материалы Международной научно-технической конференции «Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением». Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. 2009. С. 166-169.

184. Яковлев С.С., Поликарпов Е.Ю., Паламарчук И.И. Пластическое деформирование анизотропных упрочняющихся материалов // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением: сб. тезисов междунар. науч.-тех. конф. СПб.: Изд-во БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова. 2005. С. 142 – 145.

185. 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.
186. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Нечепуренко Ю.Г. Глубокая вытяжка анизотропного упрочняющегося материала // Заготовительные производства (Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). 2005. № 4. С. 38 – 44.
187. Baltov A., Savchuk A. A Rule of Anisotropik Harolening // Acta Mechanica. 1965. Vol.1. №2. P. 81-92.
188. Bhattacharyya D., Moltchaniwskyi G. Measurements of Anisotropy by the Ring Compression Test // J. Mech. Work. Technol. 1986. 13. №3. P. 325 - 330.
189. Korhonen A.S. Drawing Force in Deep Drawing of Cylindrical Cup with Flatnosed Punch // Trans. ASME J.Eng. Jnd. 1982. 104. №1. P. 29-37.
190. Korhonen A.S., Sulonen M. Force Requirements in Deep Drawing of Cylindrical Shell // Met. Sci. Rev. met. 1980. 77. №3. P. 515 - 525.
191. Lankford W.T., Snyder S.C., Bauscher J.A. New criteria for predicting the press performance of deep drawing sheets // Trans ASM. 1950. V. 42. P. 1197.
192. Lilet L., Wybo M. An investigation into the effect of plastic anisotropy and rate of work-hardening in deep drawing. // Sheet Metal Inds. 41. №450, 1964.
193. Mellor P.B., Parmar A. Plasticity Analysis of Sheet Metal Forming // Mech. Sheet Metal Forming Mater. Behav. and Deformation Anal. Proc. Symp. Warren, Mich. New York-London . 1977. P. 53 - 74.
194. Oiszak W., Urbanovski W. The Generalised Distortion Energy in the Theory of Anisotropic Bodies // Bull. Acad. Polon. Sci. -cl. IV. vol.5. №1. 1957. P. 29 - 45.
195. Wu M.C., Yeh W.C. Some Considerations in the Endochronic Description of Anisotropic Hardening // Acta. Mech. 1987. 69. №1. P. 59 - 76.

196. Wu M.C., Hong H.K., Shiao Y.P. Anisotropic plasticity with application to sheet metals // Int. J. Mech. Sci.. 1999. 41, № 6. C. 703 - 724.
197. Yamada Y., Koide M. Analysis of the Bore-Expanding Test by the Incremental Theory of Plasticity // Int. J. Mech. Sci. Vol. 10. 1968. P. 1-14.
198. Zharkov V.A. Theory and Practice of Deep Drawing. London: Mechanical Engineering Publications Limited, 1995. 601 p.

Приложение 1.

**Дополнение раздела «Теоретические основы экспериментальных исследований
пластического формоизменения» в курс «Теория обработки металлов
давлением» в виде новых лекций**

Министерство образования и науки Российской Федерации

ГОУ ВПО «Тульский государственный университет»

**Дисциплина «ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ
ДАВЛЕНИЕМ»**

**Раздел «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ»**

Под редакцией д-ра техн. наук
С.С. Яковлева

Направление подготовки: 150400 «Технологические машины
и оборудование»

Специальность: 150201 «Машины и технология обработки металлов
давлением»

Форма обучения: очная, заочная

Тула - 2010

СОДЕРЖАНИЕ

- Лекция № 1. Моделирование процессов обработки металлов давлением.....**
- 1.1. Теоремы подобия.....
 - 1.2. Методы нахождения критериев подобия.....
 - 1.3. Моделирование процессов холодной штамповки. Основные уравнения. Формулировки граничных условий
- Лекция № 2. Моделирование процессов обработки металлов давлением (продолжение).....**
- 1.4. Критерии подобия процессов холодной штамповки
 - 1.5. Моделирование скоростных процессов холодной пластической деформации
- Лекция № 3. Моделирование процессов обработки металлов давлением (продолжение).....**
- 1.6. Моделирование горячей пластической деформации.....
 - 1.7. Теория размерностей. Общие положения.....
 - 1.8. Определение аналитических связей физических явлений.....
 - 1.9. Расчет уширения металла при его прокатке между валками
- Лекция № 4. Моделирование процессов обработки металлов давлением (продолжение).....**
- 1.10. Приближенное моделирование.....
 - 1.10.1. Принципы приближенного моделирования.....
 - 1.10.2. Коэффициенты несоответствия.....
 - 1.10.3. Силовое подобие при растяжении.....
 - 1.10.4. Силовое подобие при осадке.....
- Задания для самоконтроля.....***
- Лекция № 5. Геометрические методы исследований деформированного состояния. метод делительных сеток.....**
- 2.1. Постановка задачи и основные предположения.....
 - 2.2. Геометрические методы исследования деформированного состояния.....
 - 2.3. Выбор базы сеток. Точность нанесения и измерения делительной сетки.....
 - 2.4. Способы обработки искаженной делительной сетки.....
 - 2.4.1. Методы конечных деформаций.....
- Лекция № 6. Геометрические методы исследований деформированного состояния. метод делительных сеток (подолжение).....**
- 2.4.1.1. Метод Зибеля.....

- 2.4.1.2. Метод П.О. Пашкова.....
- 2.4.2. Поэтапные методы исследования.....
- 2.4.2.1. Модернизированный метод П.О. Пашкова.....
- 2.4.2.2. Метод визиопластичности.....
- 2.4.3. Методы течения. Метод И.П. Рене.....
- 2.5. Совершенствование способа обработки искаженной дели-
тельной сетки при исследовании пластического формоиз-
менения.....

Задания для самоконтроля.....

Лекция № 7. Основы метода муар.....

- 3.1. Основные понятия.....
- 3.2. Природа муарового эффекта.....
- 3.3. Основные свойства муаровых полос.....
- 3.4. Определение деформированного состояния с помощью
муара.....

Задания для самоконтроля.....

Лекция № 8. Метод измерения твердости.....

- 4.1. Сущность метода.....
- 4.2. Способы измерения твердости.....
- 4.3. Построение тарировочных графиков.....
- 4.4. Определение интенсивности напряжений и деформаций.....

Задания для самоконтроля.....

**Лекция № 9. Деформируемость металлов в операциях обработки дав-
лением.....**

- 5.1. Пластичность металлов.....
- 5.2. Критерии деформируемости.....
- 5.3. Использование информации о деформированном состоянии
для оценки возможного разрушения металлов.....

Задания для самоконтроля.....

Библиографический список рекомендуемой литературы.....

Лекция № 1. Моделирование процессов обработки металлов давлением

План

- 1.1. Теоремы подобия
- 1.2. Методы нахождения критериев подобия
- 1.3. Моделирование процессов холодной штамповки.
Основные уравнения. Формулировки граничных условий

Производство постоянно ставит перед инженерами все новые и новые задачи. Далеко не все такие задачи поддаются теоретическим методам анализа. Физические явления, происходящие при обработке металлов давлением (ОМД), сложны и приближенно описываются громоздкой системой дифференциальных уравнений. Решение этой системы уравнений в общем виде практически не возможно. Широкое использование современных методов теории пластичности (метода характеристик, вариационных методов и др.) до настоящего времени не привело к результатам, которые можно было бы считать в достаточно полной мере удовлетворяющими всем потребностям практики. Большинство из известных решений имеет частный, приближенный характер. Получаются они в результате многочисленных допущений и математических упрощений. Только умелое сочетание теоретических методов, эксперимента и знания особенностей данного производства позволяет инженеру своевременно и с высокой надежностью найти решения поставленных задач.

Для анализа процессов ОМД большое значение имеет лабораторный эксперимент. Обычно в условиях лаборатории изучаются особенности вновь создаваемых процессов, производится поиск оптимальных режимов деформации металлов. Но здесь возникает вопрос, каким образом можно перенести лабораторные данные, полученные на модели, на реальный (натурный) процесс? На этот вопрос дает ответ теория подобия и моделирования. Значительный вклад в решение этого вопроса внесли наши отечественные исследователи: В.Л. Кирпичев, А. Федерман, Л.А. Гухман, П.Е. Жуковский, Л.И. Седов, А.А. Ильюшин, З.С. Смирнов и др.

Нам легко понятны вопросы геометрического подобия: две геометрические фигуры подобны, если отношения соответствующих их размеров одинаковы. Если известен коэффициент подобия - масштаб, то простым умножением размеров одной геометрической фигуры (модели) на величину масштаба получаются размеры другой, ей подобной геометрической фигуры (натуры).

Механическое или вообще физическое подобие является обобщением геометрического подобия. Физические явления подобны, если по известным характеристикам одного можно подучить характеристики другого простым пересчетом. Если при геометрическом моделировании пересчет осуществляется путем умножения размеров модели на масштаб, то при физическом моделировании, когда исследователя интересуют не геометрические размеры, а, например, силы, напряжения, работа и т.д., пересчет должен осуществляться по определенным более сложным правилам. Установление правил пересчета - задача моделирования.

Метод моделирования позволяет грамотно проводить экспериментальные исследования физических процессов. Этим методом можно на модели, уменьшенной

или увеличенной по сравнению с натурой, иногда имеющей другую физическую природу, проводить качественное или количественное изучение процессов, протекающих в натуре, которая не всегда доступна для детального исследования, а в ряде случаев, когда создается новый процесс или оборудование, ее вообще нет.

Теория моделирования разрабатывается, как в случае, когда процесс описывается известными дифференциальными уравнениями и соответствующими граничными условиями, так и в случае, когда процесс не имеет аналитического описания с помощью анализа размерностей.

Существуют и специальные виды математического моделирования, при котором какие-либо физические процессы исследуют путем изучения аналогичных явлений, имеющих иное физическое содержание, но описываемых теми же математическими уравнениями. Это моделирование обычно осуществляется на вычислительных машинах непрерывного действия (аналоговых установках или моделирующих машинах) с использованием комплекса многих физических устройств - моделей, способных имитировать разнообразные явления. Для математического моделирования наиболее удобны электрические модели.

Моделированием на основе теории подобия можно изучать:

1. *Влияние деформации на изменение свойств и структуры металла;*
 2. *Закономерности формоизменения металла;*
 3. *Деформированное состояние металла в различных условиях обработки давлением;*
 4. *Влияние различных способов деформации на поведение деформируемого металла;*
 5. *Влияние контактных условий на изменение свойств и поведения металла при его деформации;*
 6. *Влияние различных факторов на сопротивление деформации;*
- Распределение напряжений в очаге деформации и на контактных поверхностях и т.д.*

1.1. Теоремы подобия

Необходимые и достаточные условия подобия сформулированы в трех основополагающих теоремах подобия [12, 27].

Первая теорема определяет свойства, которыми должны обладать подобные явления. Она гласит, что если физические явления подобны друг другу, то все одноименные критерии подобия этих явлений имеют одинаковую величину.

Обозначая критерий через Π , получим для подобных явлений

$$\Pi = idem \quad (\text{одно и то же}) . \quad (1.1)$$

Критерии подобия - это независимые между собой безразмерные комплексы. Возведением в произвольную степень, умножением или делением друг на друга или на один из них, а также на постоянную величину можно получить иную систему критериев, но число их сохраняется. Первая теорема была доказана в 1848 году Ж. Бертраном.

Важно при этом отметить, что данные, полученные при исследовании какого-нибудь явления, могут быть перенесены только на явления, которые описываются одинаковыми уравнениями.

Вторая теорема подобия устанавливает, что для того, чтобы данные, полученные из опыта, можно было непосредственно распространить на подобные явления, эти данные надо обрабатывать в виде зависимости между критериями подобия. В связи с этим надо искать зависимость не между отдельными величинами, характеризующими явления, а между комплексами величин, представляющими критерии подобия.

Вторая теорема подобия утверждает, что всякое уравнение физического процесса может быть преобразовано в уравнение, выражающее однозначную связь между критериями подобия.

Уравнения, связывающие n физических величин, среди которых k величин имеют независимую размерность, всегда преобразуются в систему уравнений, в которую входят $n-k$ критериев подобия. Эта теорема была сформулирована и доказана А. Федерманом (1911 г.) и Ж. Букингемом (1914 г.).

Значение второй теоремы подобия состоит в том, что она позволяет находить критерии подобия и в тех случаях, когда уравнение связи неизвестно, но выяснены параметры исследуемого явления. Она получила название " π -теоремы".

Третья теорема подобия сформулирована М.В. Кирпичевым и А.А. Гухманом. Согласно этой теореме два явления подобны, если они описываются одной и той же системой уравнений, имеют подобные граничные условия (условие однозначности) и равные определяющие критерии подобия.

Первые две теоремы устанавливают соотношения между параметрами заведомо подобных явлений. Третья теорема определяет признаки подобия явлений.

Если явление сложно и не удастся составить уравнение связи между параметрами процесса, то для разыскания критериев подобия используются методы анализа размерностей. При этом необходимо определить систему размерностей и перечень параметров, существенных для процесса.

Формулы размерностей параметров преобразуются в степенные комплексы и далее находятся число и вид критериев подобия, качество размерного анализа зависит от того, насколько правильно определены число и род параметров, существенных для процесса. Указаний, как подбирать эти параметры, теория размерностей не дает. Методы анализа размерностей не определяют достаточных условий подобия, что может привести к опасности чрезмерно широких обобщений.

Однако если исходные предпосылки сформулированы правильно, то анализ размерностей дает верные результаты.

1.2. Методы нахождения критериев подобия

Если физический процесс имеет математическое описание в виде системы исходных уравнений и условий однозначности, то критерии подобия могут быть получены методами подобных преобразований этой системы.

В случае моделирования пластической деформации необходимо рассмотреть полную систему дифференциальных уравнений теории пластичности и соответствующие граничные условия.

1.3. Моделирование процессов холодной штамповки. Основные уравнения. Формулировки граничных условий

Рассмотрим моделирование процесса холодной штамповки [8].

Для простоты примем, что материал обладает свойством идеальной пластичности. Ограничимся случаем изотермической деформации достаточно медленного течения.

Полная система дифференциальных уравнений теории пластического течения Леви-Мизеса включает в себя:

- уравнения связи между напряжениями и скоростями деформации

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} - \sigma &= \frac{2\tau_s}{H} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x}; & \tau_{xy} &= \frac{\tau_s}{H} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right); \\ \sigma_{yy} - \sigma &= \frac{2\tau_s}{H} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y}; & \tau_{yz} &= \frac{\tau_s}{H} \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right); \\ \sigma_{zz} - \sigma &= \frac{2\tau_s}{H} \cdot \frac{\partial V_z}{\partial z}; & \tau_{zx} &= \frac{\tau_s}{H} \left(\frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z} \right); \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

или сокращенно
$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = \frac{2\tau_s}{H} \dot{\epsilon}_{ij};$$

- уравнения равновесия

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma + \frac{2\tau_s}{H} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\tau_s}{H} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\tau_s}{H} \left(\frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) \right] &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\tau_s}{H} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma + \frac{2\tau_s}{H} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\tau_s}{H} \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) \right] &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\tau_s}{H} \left(\frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\tau_s}{H} \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma + \frac{2\tau_s}{H} \cdot \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

или сокращенно
$$\left(\frac{2\tau_s}{H} \dot{\epsilon}_{ij} + \sigma \delta_{ij} \right)_j = 0;$$

- соотношения Коши

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}_{xx} &= \frac{\partial V_x}{\partial x}; & \dot{\epsilon}_{xy} &= \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right); \\ \dot{\epsilon}_{yy} &= \frac{\partial V_y}{\partial y}; & \dot{\epsilon}_{yz} &= \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right); \\ \dot{\epsilon}_{zz} &= \frac{\partial V_z}{\partial z}; & \dot{\epsilon}_{zx} &= \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z} \right); \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

- условие несжимаемости

$$\dot{e}_{xx} + \dot{e}_{yy} + \dot{e}_{zz} = 0, \quad (1.5)$$

где

$$\sigma = \frac{(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})}{3};$$

$$H = \sqrt{\frac{2}{3} \left[(\dot{e}_{xx} - \dot{e}_{yy})^2 + (\dot{e}_{yy} - \dot{e}_{zz})^2 + (\dot{e}_{zz} - \dot{e}_{xx})^2 + \frac{3}{2} (\dot{\gamma}_{xy}^2 + \dot{\gamma}_{yz}^2 + \dot{\gamma}_{zx}^2) \right]}$$

\dot{e}_{ij} - компоненты тензора скоростей деформаций; V_i - скорость течения материала; τ_s - предел текучести на сдвиг.

Для определения девяти неизвестных σ_{ij} и V_i имеется девять уравнений, т.е. эта система уравнений является полной.

Сформулируем граничные условия. Пусть для определенности рассматривается моделирование операции осадки (рис. 1.1).

Тогда граничные условия исследуемого процесса таковы: на свободной поверхности S_F

$$F_i^H = F_i^M = 0, \quad (1.6)$$

на контактной поверхности инструмента S_K

$$V_n^H = V_n^M, \quad \tau_K = \psi \tau_s. \quad (1.7)$$

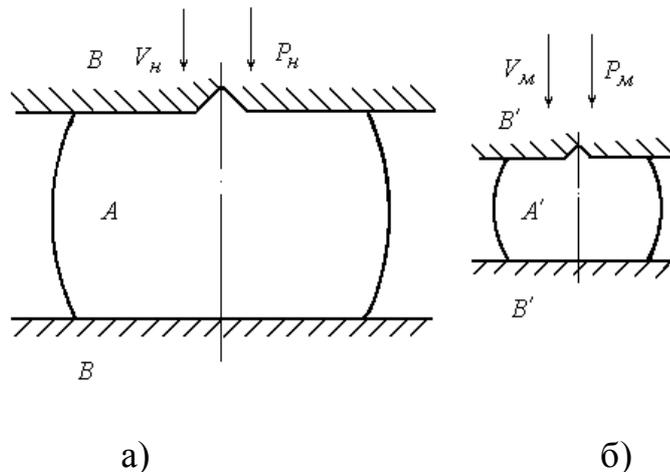


Рис. 1.1. Схема осадки заготовки произвольной формы к выводу условий подобия и моделирования: а - натуральный процесс; б – модель

Поверхность S_V , на которой задана скорость течения материала, а напряжения неизвестны, отсутствует. Для получения критериев подобия приведем указанные выше уравнения (1.2), (1.3), (1.6), (1.7) к безразмерному виду. Для этого необходимо все размерные переменные задачи привести к безразмерному виду, выбрав в качестве масштабов характерные параметры процесса. Например, введем безразмерные напряжения

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{2\tau_s}; \quad (1.8)$$

безразмерные скорости

$$\bar{V}_i = \frac{V_i}{V}; \quad (1.9)$$

безразмерные координаты

$$\bar{x} = \frac{x}{l}; \quad \bar{y} = \frac{y}{b}; \quad \bar{z} = \frac{z}{h}. \quad (1.10)$$

где V - скорость движения верхнего штампа; l, b, h - длина, ширина, высота заготовки.

Уравнение связи между напряжениями и скоростями деформаций (1.2) теперь преобразуется к виду:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_{xx} - \bar{\sigma} &= \frac{V}{H} \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{x}}; & \bar{\tau}_{xy} &= \frac{V}{2H} \left(\frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{x}} \right); \\ \bar{\sigma}_{yy} - \bar{\sigma} &= \frac{V}{H} \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{y}}; & \bar{\tau}_{yz} &= \frac{V}{2H} \left(\frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{y}} \right); \\ \bar{\sigma}_{zz} - \bar{\sigma} &= \frac{V}{H} \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{z}}; & \bar{\tau}_{zx} &= \frac{V}{2H} \left(\frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{z}} \right), \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

где

$$H = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{x}} \cdot \frac{V}{l} - \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{y}} \cdot \frac{V}{b} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{y}} \cdot \frac{V}{b} - \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{z}} \cdot \frac{V}{h} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{z}} \cdot \frac{V}{h} - \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{x}} \cdot \frac{V}{l} \right)^2 + \frac{3}{2} \left[\left(\frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{y}} \cdot \frac{V}{b} + \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{x}} \cdot \frac{V}{l} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{z}} \cdot \frac{V}{h} + \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{y}} \cdot \frac{V}{b} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{x}} \cdot \frac{V}{l} + \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{z}} \cdot \frac{V}{h} \right)^2 \right]}. \quad (1.12)$$

Вынесем из-под радикала множитель V/h , тогда формулы (1.11) и (1.12) приобретут такой вид:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_{xx} - \bar{\sigma} &= \frac{h}{l} \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{x}}; & \bar{\tau}_{xy} &= \frac{\frac{h}{b} \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{y}} + \frac{h}{l} \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{x}}}{2\bar{H}}; \\ \bar{\sigma}_{yy} - \bar{\sigma} &= \frac{h}{b} \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{y}}; & \bar{\tau}_{yz} &= \frac{\frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{z}} + \frac{h}{b} \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{y}}}{2\bar{H}}; \\ \bar{\sigma}_{zz} - \bar{\sigma} &= \frac{\partial \bar{z}}{\bar{H}}; & \bar{\tau}_{zx} &= \frac{\frac{h}{l} \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{z}}}{2\bar{H}}, \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

где

$$\bar{H} = \sqrt{\frac{2}{3} \left[\left(\frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{x}} \cdot \frac{h}{l} - \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{y}} \cdot \frac{h}{b} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{y}} \cdot \frac{h}{b} - \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{z}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{z}} - \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{x}} \cdot \frac{h}{l} \right)^2 + \right.}$$

$$\left. + \frac{3}{2} \left[\left(\frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{y}} \cdot \frac{h}{b} + \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{x}} \cdot \frac{h}{l} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{y}} \cdot \frac{h}{b} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{x}} \cdot \frac{h}{l} + \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{z}} \right)^2 \right] \right]. \quad (1.14)$$

Аналогично приведем уравнения равновесия (1.3) к безразмерному виду:

$$\left. \begin{aligned} \frac{h}{l} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{\sigma} + \frac{\frac{h}{l} \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{x}}}{\bar{H}} \right) + \frac{h}{b} \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left(\frac{\frac{h}{b} \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{y}} + \frac{h}{l} \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{x}}}{2\bar{H}} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\frac{\frac{h}{l} \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{z}}}{2\bar{H}} \right) &= 0; \\ \frac{h}{l} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\frac{\frac{h}{b} \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{y}} + \frac{h}{l} \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{x}}}{2\bar{H}} \right) + \frac{h}{b} \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left(\bar{\sigma} + \frac{\frac{h}{b} \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{y}}}{\bar{H}} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\frac{\frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{z}} + \frac{h}{b} \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{y}}}{2\bar{H}} \right) &= 0; \\ \frac{h}{l} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\frac{\frac{h}{l} \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{z}}}{2\bar{H}} \right) + \frac{h}{b} \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left(\frac{\frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{z}} + \frac{h}{b} \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{y}}}{2\bar{H}} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\bar{\sigma} + \frac{\frac{h}{b} \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial \bar{z}}}{\bar{H}} \right) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

Граничные условия в безразмерном виде будут: на поверхности S_F

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_{xx}n_x + \bar{\tau}_{yx}n_y + \bar{\tau}_{zx}n_z &= 0; \\ \bar{\tau}_{xy}n_x + \bar{\sigma}_{yy}n_y + \bar{\tau}_{zy}n_z &= 0; \\ \bar{\tau}_{zx}n_x + \bar{\tau}_{yz}n_y + \bar{\sigma}_{zz}n_z &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

на поверхности S_K

$$\bar{V}_x n_x + \bar{V}_y n_y + \bar{V}_z n_z = 0, \quad (1.17)$$

где n_i - направляющие косинусы нормали к поверхности инструмента.

Таким образом, решение краевой задачи, описывающей исследуемый процесс, должно удовлетворять системе дифференциальных уравнений (1.13), (1.15), а также граничным условиям (1.16) и (1.17), записанным в безразмерном виде.

Лекция № 2. Моделирование процессов обработки металлов давлением (продолжение)

План

- 1.4. Критерии подобия процессов холодной штамповки
- 1.5. Моделирование скоростных процессов холодной пластической деформации

1.4. Критерии подобия процессов холодной штамповки

Обозначим α - решение рассматриваемой задачи относительно любой из искомым величин $\bar{\sigma}_{ij}$ или \bar{V}_i :

$$\alpha = \alpha\left(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \frac{h}{l}, \frac{h}{b}, n_x, n_y, n_z, \psi\right). \quad (1.18)$$

Сходственными точками природы и модели назовем такие точки, относительные координаты которых одинаковы, т.е.

$$\bar{x}_H = \bar{x}_M; \quad \bar{y}_H = \bar{y}_M; \quad \bar{z}_H = \bar{z}_M.$$

Основной закон подобия требует, чтобы напряженно-деформированное состояние ($\bar{\sigma}_{ij}$ и \bar{V}_i) в сходственных точках модели и природы было одинаково

$$\alpha_H = \alpha_M.$$

Для этого необходимо и достаточно, чтобы все аргументы функций (1.18) у природы и модели были одинаковы:

$\left(\frac{h}{l}\right)_H = \left(\frac{h}{l}\right)_M; \left(\frac{h}{b}\right)_H = \left(\frac{h}{b}\right)_M; (n_x)_H = (n_x)_M; (n_y)_H = (n_y)_M; (n_z)_H = (n_z)_M$ - в любой сходственной точке природы и модели, $\psi_H = \psi_M$.

Другими словами: природа и модель должны быть геометрически подобны и должны быть одинаковы коэффициенты прандлева трения ψ .

Аргументы в выражении (1.18), кроме безразмерных координат, называются критериями подобия. Заметим, что моделирование необязательно осуществлять на том же материале.

Установленный закон подобия помогает рассчитать механические переменные природы, если они известны в результате лабораторного эксперимента для модели.

Рассмотрим определение механической переменной - удельного давления на инструмент p . Условия подобия при моделировании соблюдены: природа и модель геометрически подобны, а коэффициенты трения ψ - одинаковы. Тогда в сходственных точках

$$\bar{p}_H = \bar{p}_M \quad \text{или} \quad \frac{\bar{p}_H}{2\tau_{SH}} = \frac{\bar{p}_M}{2\tau_{SM}},$$

т.е.

$$\frac{P_H}{P_M} = \frac{\tau_{SH}}{\tau_{SM}}. \quad (1.19)$$

Таким образом, удельные давления на инструмент природы и модели относятся друг к другу так же, как пределы текучести природы и модели.

Для практических целей представляет большой интерес установление правил пересчета некоторых интегральных характеристик: силы деформации, мощности, работы и т.п.

Рассмотрим усилие осадки (рис. 1.1):

$$P = \int_{S_K} F_z dS,$$

где S_K - поверхность соприкосновения штампа и заготовки; F_Z - вертикальная составляющая полного напряжения на контактной площадке.

Согласно теореме о среднем $P = F_{zcp} \cdot S_K$ для природы и модели можем записать:

$$P_H = F_{zcp}^H \cdot S_{KH}; \quad P_M = F_{zcp}^M \cdot S_{KM}.$$

Безразмерные напряжения в сходственных точках равны, т.е.

$$\frac{F_{zcp}^H}{2\tau_{SH}} = \frac{F_{zcp}^M}{2\tau_{SM}} \quad \text{или} \quad \frac{P_H}{P_M} = \frac{F_{zcp}^H}{F_{zcp}^M} \cdot \frac{S_{KH}}{S_{KM}} = \frac{\tau_{SH}}{\tau_{SM}} \cdot \frac{S_{KH}}{S_{KM}}.$$

Если материал модели и природы одинаков, то $\frac{P_H}{P_M} = \frac{S_{KH}}{S_{KM}}$.

Примем масштаб моделирования $m = \frac{l_H}{l_M} = \frac{b_H}{b_M} = \frac{h_H}{h_M}$, тогда

$$\frac{P_H}{P_M} = m^2. \quad (1.20)$$

Если материалы модели и природы разные, то

$$\frac{P_H}{P_M} = m^2 \frac{\tau_{SH}}{\tau_{SM}}. \quad (1.21)$$

Рассмотрим мощность деформирования

$$N = P \cdot V.$$

Отношение мощностей деформации природы и модели с одинаковым пределом текучести будет:

$$\frac{N_H}{N_M} = \frac{P_H}{P_M} \cdot \frac{V_H}{V_M} = m^2 \frac{V_H}{V_M}.$$

Учитывая, что

$$\frac{V_H}{V_M} = \frac{\left(\frac{dh}{dt}\right)_H}{\left(\frac{dh}{dt}\right)_M} = \frac{dh_H}{dh_M} = m,$$

получим

$$\frac{N_H}{N_M} = m^3. \quad (1.22)$$

Таким образом, если модельные испытания проводились на том же материале, который подвергается в натуральных условиях обработке давлением, и геометрические размеры модели были в m раз меньше, чем натуре, то усилие на инструмент в натуре будет в m^2 раз больше, чем в модели, при скорости натуре в m раз больше, чем в модели, мощность обработки и затраты энергии будут в m^3 раз больше, чем в модели.

Формулы (1.19), (1.20), (1.22) известны в литературе по обработке металлов давлением под названием закона подобия при деформации геометрически подобных тел [27].

1.5. Моделирование скоростных процессов холодной пластической деформации

Рассмотрим случай моделирования скоростных процессов пластической деформации. Материал будем считать идеально пластическим. Скоростное упрочнение во внимание принимать не будем. Процесс рассматриваем изотермическим, соответствующим холодной деформации.

Отличие полной системы уравнений для этой задачи от случая, рассмотренного выше, состоит в том, что вместо уравнений равновесия будут уравнения движения.

Например,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma + \frac{2\tau_S}{H} \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\tau_S}{H} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\tau_S}{H} \left(\frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) \right] = \rho \frac{dV_x}{dt}. \quad (1.23)$$

Начальные условия для определенности примем нулевыми. Введем безразмерные переменные по формулам (1.8), (1.9), (1.10), а также $\bar{t} = t/t_0$, где t_0 - некоторое характерное время. Удобно в качестве характерной скорости V принять скорость штампа в момент встречи с заготовкой V_0 , тогда t_0 можно принять равным, например, $t_0 = h/V_0$. Перейдя в уравнениях (1.23) к безразмерным характеристикам, найдем, что наряду с критериями подобия, которые были установлены ранее, для выполнения подобия модельного эксперимента быстрого течения должен выполняться еще один критерий:

$$\frac{\rho V_0^2}{\tau_S} = idem. \quad (1.24)$$

При проектировании модельного эксперимента несложно выполнить требования о геометрическом подобии и равенстве коэффициентов трения для модели и натуре.

Удовлетворить критерию (1.24) $\left(\frac{\rho V_0^2}{\tau_S} \right)_M = \left(\frac{\rho V_0^2}{\tau_S} \right)_H$ сложнее. Потребуем,

чтобы выполнялось условие о геометрическом подобии с масштабом m во все время деформации, тогда

$$\frac{V_{OH}^2}{V_{OM}^2} = m^2 .$$

В этом случае масштаб моделирования, плотность и сопротивление деформации для модели и природы будут связаны между собой соотношением

$$m = \sqrt{\frac{\rho_M}{\rho_H} \cdot \frac{\tau_{SH}}{\tau_{SM}}} . \quad (1.25)$$

Масштаб моделирования не может быть любым, он должен быть выбран в соответствии с условием (1.25). Для того чтобы m было больше 1, необходимо модельный материал выбрать "помягче", чем натура, и тяжелее. В этом отношении удобен для моделирования свинец и его сплавы. Моделирование скоростных процессов на материале природы невозможно, т.е. в этом случае масштаб моделирования равен 1.

Лекция № 3. Моделирование процессов обработки металлов давлением (продолжение)

План

- 1.6. Моделирование горячей пластической деформации
- 1.7. Теория размерностей. Общие положения
- 1.8. Определение аналитических связей физических явлений
- 1.9. Расчет уширения металла при его прокатке между валками

1.6. Моделирование горячей пластической деформации

Рассмотрим вопрос моделирования горячей пластической деформации [4, 8].

Принимаем течение медленным; учтем скоростное упрочнение металла и тепловой эффект; заметим, что материал, деформируемый в горячем состоянии, не подчиняется условию идеальной пластичности. В физических уравнениях связи напряжений и скоростей деформаций

$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = \frac{2T(H, \theta)}{H} \dot{e}_{ij} \quad (1.26)$$

существенную роль играет функция $T = T(H, \theta)$, описывающая "единую кривую" зависимости сопротивления деформации T от скорости деформации H и температуры θ . Применим безразмерные величины для напряжений (1.8), полагая, что τ_S - предел текучести при сдвиге в условиях статических испытаний ($H \rightarrow 0$), тогда

$$\bar{\sigma}_{ij} - \bar{\sigma} \delta_{ij} = \frac{T(H, \theta)}{\tau_S H} \dot{e}_{ij}. \quad (1.27)$$

Считаем, что "единую кривую" как для модели, так и для природы можно описать формулой:

$$T = \tau_S + AH^B, \quad (1.28)$$

в которой τ_S, A, B - функции температуры.

Решая совместно (1.27) и (1.28) и учитывая (1.12), (1.14), получим

$$\bar{\sigma}_{ij} - \bar{\sigma} \delta_{ij} = \left[1 + \frac{A}{\tau_S} \left(\frac{V_0}{h} \right)^B \bar{H}^B \right] \frac{\bar{e}_{ij}}{\bar{H}}, \quad (1.29)$$

где $\bar{e}_{ij} = h \dot{e}_{ij} / V_0$; $\bar{H} = hH / V_0$; V_0 - скорость встречи бойка с заготовкой.

Моделирование требует, чтобы во всех соответственных точках $\bar{\sigma}_{ij}, \bar{e}_{ij}, \bar{H}$ были одинаковыми как для модели, так и для природы. Этого можно достичь только в случае, если за критерий подобия в формулах (1.29) принять

$$R_1 = \frac{A}{\tau_S} \left(\frac{V_0}{h} \right)^B = idem. \quad (1.30)$$

Обратимся к дифференциальному уравнению теплового баланса:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + TH = \rho c \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + V_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + V_y \frac{\partial \theta}{\partial y} + V_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right), \quad (1.31)$$

где λ - коэффициент теплопроводности, ккал/ (м.ч.град); c - коэффициент удельной теплоемкости, ккал/(град.кг.).

В последнем выражении после умножения на dt справа получится количество тепла, идущее на повышение температуры в единице объема тела за время dt , а слева - количество тепла, поступившее за счет теплопроводности и выделения тепла при пластической деформации. Введем безразмерные величины по формулам (1.8), (1.9), (1.10), (1.12), (1.14), а также

$$\bar{T} = \frac{T}{2\tau_S}; \quad \bar{\theta} = \frac{\theta}{\theta_0}; \quad \bar{t} = \frac{t}{h} V_0,$$

где V_0 - скорость встречи штампа с заготовкой; θ_0 - характерная температура, например, температура заготовки перед осадкой, равномерная по деформируемому телу.

Уравнение (1.31) в безразмерном виде запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{h^2}{l^2} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{h^2}{b^2} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{z}^2} + \frac{2\tau_S V_0 h}{\lambda \theta_0} \bar{T} \bar{H} = \\ = \frac{\rho c V_0 h}{\lambda} \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{t}} + \frac{h}{l} \bar{V}_x \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{x}} + \frac{h}{b} \bar{V}_y \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{y}} + \bar{V}_z \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{z}} \right). \end{aligned} \quad (1.32)$$

Основная теорема подобия требует, чтобы в соответственных точках и в сходственных моменты времени безразмерные переменные $\bar{\sigma}_{ij}$, $\bar{\theta}$, \bar{H} , \bar{V}_i , \bar{T} для модели и природы были одинаковыми. Решение уравнения (1.32) для модели и природы относительно $\bar{\theta}$ будут одинаковыми, если коэффициенты этого уравнения одинаковы для модели и природы. А это значит, что модель и натура должны быть геометрически подобны, в сходственных точках должны быть одинаковы \bar{T} , \bar{H} , \bar{V}_i и, кроме того, должны выполняться следующие критерии подобия:

$$R_2 = \frac{\tau_S V_0 h}{\lambda \theta_0} = idem; \quad (1.33)$$

$$R_3 = \frac{\rho c V_0 h}{\lambda} = idem. \quad (1.34)$$

Обратимся теперь к граничным условиям тепловой части задачи.

Боковая поверхность заготовки теряет тепло излучением и конвективным образом. Однако эти потери не столь велики по сравнению с потерями в месте контакта заготовки с холодным инструментом. В дальнейшем для простоты не будем учитывать потери тепла через боковую поверхность:

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} = 0 \quad (1.35)$$

или в безразмерном виде

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{n}} = 0. \quad (1.36)$$

Условие (1.36) идентично как для модели, так и для природы. Из этого соотношения не вытекает никаких дополнительных критериев. На контактной поверхности имеет место скольжение деформируемого материала по инструменту, мощность этого теплового источника, действующего на единицу поверхности будет $\psi \tau_S V_S$, где V_S - скорость скольжения.

Тепловой поток из горячей заготовки А в инструмент В балансируется с выделением тепла от трения:

$$\psi \tau_S V_S - \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_A + \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_B = 0, \quad (1.37)$$

где n - внешняя нормаль к поверхности заготовки.

Кроме того, можно считать, что на контактной поверхности температура деформируемого тела А и инструмента В равны друг другу:

$$\theta_A = \theta_B. \quad (1.38)$$

Условие (1.38) при моделировании и натуральном эксперименте удовлетворяются автоматически и поэтому из него не вытекает каких-либо критериев.

Выделим критерий подобия из условия (1.37). Примем безразмерную нормаль и скорость скольжения $\bar{n} = n/h$; $\bar{V}_S = V_S/V_0$ тогда условие (1.37) в безразмерном виде запишется следующим образом:

$$\frac{\psi \tau_S V_0 h}{\lambda_A \theta_0} \bar{V}_S - \frac{\partial \bar{\theta}_A}{\partial \bar{n}} + \frac{\lambda_B}{\lambda_A} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{n}} = 0. \quad (1.39)$$

Для того, чтобы условие (1.39) было одинаковым для модели и для природы и соответствующие температуры в соответствующих точках равны, кроме равенства коэффициентов трения ψ и удовлетворения критерия подобия R_2 , следует потребовать идентичности на модели и натуре еще одного критерия:

$$R_4 = \frac{\lambda_B}{\lambda_A} = idem, \quad (1.40)$$

т.е. отношение коэффициентов теплопроводности инструмента и деформируемого тела должны быть равными в модели и натуре.

Соответствующая температура инструмента до опыта в модели и натуре должна быть одинаковой:

$$\begin{aligned} \theta_A(x, y, z)|_{t=0} &= \theta_0 = const; \\ \theta_B(x, y, z)|_{t=0} &= \theta_1 = const. \end{aligned}$$

В безразмерном виде эти начальные условия будут

$$\bar{\theta}_A|_{t=0} = 1; \quad \bar{\theta}_B|_{t=0} = \frac{\theta_1}{\theta_0},$$

т.е. эксперимент должен быть построен так, чтобы для модели и природы в инструменте начальная температура была бы такой, чтобы

$$R_5 = \frac{\theta_1}{\theta_0} = idem. \quad (1.41)$$

Таким образом, для того чтобы осуществить модельный эксперимент по горячей деформации металла, мы должны подобрать следующие условия опыта: модель должна быть геометрически подобна натуре, модель и натура должны иметь одинаковые коэффициенты трения, соответственные начальные температуры модели и природы должны быть одинаковы, а также должны выполняться критерии подобия R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 . Подбор материала модели, который бы удовлетворял всем требованиям, - сложная задача.

Рассмотрим случай, когда материал модели и природы один и тот же. В этом случае

$$A_H = A_M; B_H = B_M; \tau_{SH} = \tau_{SM}; \lambda_{AH} = \lambda_{AM}; \lambda_{BH} = \lambda_{BM}; \rho_H = \rho_M;$$

$c_H = c_M$ Температура природы и модели в исходном состоянии одинаковы. Критерии подобия в этом случае приобретут вид:

$$R'_1 = \left(\frac{V_0}{h} \right)_H = \left(\frac{V_0}{h} \right)_M; \quad (1.42)$$

$$R'_2 = R'_3 = (V_0 h)_H = (V_0 h)_M. \quad (1.43)$$

Критерии подобия R_4 и R_5 удовлетворяются автоматически.

Легко видеть, что эти критерии противоречивы, и удовлетворить их одновременно невозможно. Действительно, пусть моделирование осуществляется в меньшем масштабе, то есть $h_H > h_M$. Из условия (1.42) следует, что в модельном опыте должно быть $V_{0M} < V_{0H}$ во столько же раз, во сколько $h_H > h_M$. Но это противоречит условию (1.43), из которого следует, что если мы уменьшим размеры модели, то во столько же раз должны увеличить скорость V_0 .

Однако иногда модельный эксперимент на том же материале возможен. Если скоростное упрочнение невелико (его можно не принимать в расчет), то условие (1.42) можно исключить и опыт проектировать только с условием (1.43). Такое предположение оправдывается тем, что многие металлы проявляют заметные скоростные упрочнения в результате изменения скорости деформации на порядок и выше.

В других случаях, когда температурные условия не играют существенного значения, то из двух противоречащих условий выбирают только условие (1.42). Так бывает при изучении механических свойств металлов при высоких температурах. Опыты стремятся провести в условиях, близких к изотермическим, предупреждая различными мерами охлаждения образца. В этом случае теплового "движения" практически нет и его влияние не принимают в расчет.

1.7. Теория размерностей. Общие положения

Если явление столь сложно, что изучению его не может предшествовать формулировка соответствующей системы уравнений, граничных условий и начальных условий, а тем более их решение и установление связей между параметрами процесса, то изучение этого явления осуществляется экспериментально, а для отыскания критериев подобия используются методы анализа размерностей. Эти методы помогают также исследователю существенно сократить число переменных, которые приходится варьировать в процессе эксперимента. Методы анализа размерностей, прав-

да, не определяют достаточных условий подобия, что может привести к опасности чрезмерно широких обобщений. Однако, если исходные предпосылки формулированы правильно, то анализ размерностей дает верные результаты [18, 28].

Каждой физической величине соответствует определенная единица измерения. В механике используют три основные единицы измерения, а именно длины, массы и времени - L , M , T . Остальные единицы называются производными. Например, единицы скорости и напряжения выражаются через три основные. Скорость имеет размерность LT^{-1} , размерность силы из закона Ньютона $F=ma - MLT^{-2}$, а напряжение - $MT^{-2}L^{-1}$.

Заметим, что в формулы размерности физических величин размерности основных единиц измерения входят в степенях.

Размерностью называется выражение производной единицы измерения через основные единицы измерения. Если изучаются наряду с механическими категориями термодинамические явления, то к основным единицам измерения можно добавить единицы измерения температуры.

1.8. Определение аналитических связей физических явлений

Рассмотрим с позиции метода анализа размерностей задачу об определении аналитической связи между путем S , проходимым свободно падающим телом, временем падения t и другими обстоятельствами [8, 18]. В свое время Галилей экспериментально доказал, что этот путь можно определить по формуле:

$$S = \frac{1}{2}gt^2, \quad (1.44)$$

где g - ускорение силы тяжести.

Будем считать, что формула (1.44) неизвестна, и "получим" ее вновь методом анализа размерностей.

Первым этапом решения методом размерностей является выявление физических величин, от которых зависит изучаемое явление.

Очевидно, что S зависит от времени t и от ускорения силы тяжести g . Это означает, что S является искомой функции

$$S = f(g, t). \quad (1.45)$$

Наша цель состоит в отыскании вида этой функции. Искомую функцию можно представить в виде отрезка степенного ряда:

$$S = C_1 g^a t^b + C_2 g^{a'} t^{b'} + \dots, \quad (1.46)$$

где C_1, C_2, \dots , - неизвестные безразмерные коэффициенты.

Метод размерностей требует, чтобы каждый одночлен этого уравнения имел одинаковые размерности длины, массы и времени.

Так как размерность S есть L , $g - L \cdot T^{-2}$, $t - T$, то из (1.46) вытекает такое уравнение размерностей:

$$L = (L \cdot T^{-2})^a \cdot T^b$$

или

$$L = L^a \cdot T^{b-2a}.$$

Неизвестные показатели степени a и b определяются согласно основному принципу теории размерностей: любое уравнение, однотипное с вышеприведенным, должно быть однородным по размерностям, то есть показатели при основных единицах должны быть одинаковыми в каждом члене уравнения. Следовательно, налицо следующая система из двух уравнений:

$$\text{для показателей при } L \quad 1 = a;$$

$$\text{для показателей при } T \quad 0 = b - 2a.$$

Решим эту систему уравнений и получим $a=1, b=2$.

Следовательно, искомая функция имеет вид:

$$S = cgt^2. \quad (1.47)$$

Оценка численного коэффициента c методами размерностей невозможна. Его следует определить экспериментально. Нужно ограничиться всего лишь одним опытом, определить из него S и t , тогда найдем из последнего выражения, что $c \cong 1/2$.

Метод анализа размерностей значительно облегчает труд экспериментаторов, освободив его от серии опытов, в которых он должен был от опыта к опыту варьировать время падения, ускорение силы тяжести (в земных условиях это сделать трудно), замеряя в каждом опыте путь падения S .

Отдавая должное простоте и эффективности метода анализа размерностей, не следует переоценивать возможности этого метода. Не всегда столь просто можно представить зависимости исследуемой величины от исследуемых параметров, как это было в предыдущем примере. Одного члена ряда (1.46) может оказаться недостаточно для хорошего аналитического описания процесса. Выбирая основные факторы или физические параметры, от которых зависит исследуемая величина, можно допустить просчет и не включить в перечень какую-либо важную переменную.

Таким образом, метод анализа размерностей состоит из следующих этапов:

- 1) перечисляются факторы, от которых может зависеть исследуемая величина;
- 2) составляется степенной одночлен предполагаемой зависимости;
- 3) пишется уравнение размерностей этого одночлена;
- 4) приравнявая показатели степени при размерностях основных единиц в правой и левой частях уравнения размерностей, получаем систему уравнений, которая позволяет либо определить показатели степени; либо существенно уменьшить число неизвестных показателей степени;
- 5) возвращаются к одночлену, заменяя конкретными значениями его показатели степени.

1.9. Расчет уширения металла при его прокатке между валками

Рассмотрим вопрос об определении критериев подобия методом анализа размерностей на примере задачи расчета уширения металла при его прокатке между валками [8, 27]. При прокатке прямоугольной полосы, уширение оценивается величиной

$$\Delta b = b_1 - b_0, \quad (1.48)$$

где b_1 и b_0 - ширина полосы после и до прокатки.

Выберем величины, от которых зависит уширение:

$$\Delta b = f(b_0, h_0, \Delta h, D, p, \tau), \quad (1.49)$$

где b_0, h_0 - размеры полосы до прокатки; Δh - обжатие; D - диаметр валков; p, τ - нормальное и касательное напряжение на поверхности контакта полосы с валком.

Функцию (1.49) можно представить в виде отрезка степенного ряда:

$$\Delta b = \sum_{i=1}^n c_i \cdot b_0^{\alpha_i} \cdot h_0^{\beta_i} \cdot \Delta h^{\gamma_i} \cdot D^{\delta_i} \cdot p^{\varepsilon_i} \cdot \tau^{\lambda_i}. \quad (1.50)$$

Каждое из слагаемых должно быть одной размерности и соответствовать размерности $\Delta b(L)$.

Для произвольного i -го члена ряда можно записать уравнение размерностей:

$$L = L^{\alpha_i} L^{\beta_i} L^{\gamma_i} L^{\delta_i} (M^{\varepsilon_i} T^{-2\varepsilon_i} L^{-\varepsilon_i}) (M^{\lambda_i} T^{-2\lambda_i} L^{-\lambda_i}), \quad (1.51)$$

из которого вытекают три уравнения:

$$\left. \begin{array}{l} L \quad 1 = \alpha_i + \beta_i + \gamma_i + \delta_i - \varepsilon_i - \lambda_i; \\ M \quad 0 = \varepsilon_i + \lambda_i; \\ T \quad 0 = -2\varepsilon_i - 2\lambda_i. \end{array} \right\} \quad (1.52)$$

Последние два уравнения линейно зависимы, из них следует, что $\varepsilon_i = -\lambda_i$. От системы уравнений (1.52) остается одно уравнение

$$\alpha_i + \beta_i + \gamma_i + \delta_i = 1.$$

Решаем его относительно

$$\beta_i = 1 - \alpha_i - \gamma_i - \delta_i.$$

Следовательно, соотношение (1.50) можно переписать в виде:

$$\Delta b = \sum_{i=1}^n c_i \cdot b_0^{\alpha_i} \cdot h_0^{1-\alpha_i-\gamma_i-\delta_i} \Delta h^{\gamma_i} \cdot D^{\delta_i} \cdot p^{-\lambda_i} \cdot \tau^{\lambda_i}$$

или

$$\Delta b = \sum_{i=1}^n c_i \left(\frac{b_0}{h_0} \right)^{\alpha_i} \cdot \left(\frac{\Delta h}{h_0} \right)^{\gamma_i} \cdot \left(\frac{D}{h_0} \right)^{\delta_i} \cdot \left(\frac{\tau}{p} \right)^{\lambda_i} \cdot h_0.$$

Полагая, что $\tau = \mu p$, получаем окончательную формулу уширения:

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = \sum_{i=1}^n c_i \left(\frac{b_0}{h_0} \right)^{\alpha_i} \left(\frac{\Delta h}{h_0} \right)^{\gamma_i-1} \left(\frac{D}{h_0} \right)^{\delta_i} \mu^{\lambda_i}. \quad (1.53)$$

Отсюда следует, если натура и модель геометрически подобны, то из условия $\Delta b / \Delta h = idem$ вытекают критерии подобия:

$$\frac{b_0}{h_0} = idem; \quad \frac{\Delta h}{h_0} = idem; \quad \frac{D}{h_0} = idem; \quad \mu = idem. \quad (1.54)$$

Чтобы убедиться в правильности уравнения (1.53), проверим его в соответствии с требованиями "π - теоремы" учения о размерностях (см. раздел I).

Общее число n - величин, входящих в уравнение (1.50), равно - 7.

Число k - величин с независимыми размерностями - 3.

Поэтому, согласно "π - теореме", число критериев подобия должно быть равно:

$$t_n = n - k = 7 - 3 = 4.$$

Таким образом, уравнение связи между критериями подобия (1.53) является правильным, поскольку оно находится в соответствии с "π - теоремой".

Из выражения (1.53) можно получить много формул, придавая конкретные значения параметрам $c_i, \lambda_i, \gamma_i, \delta_i, \lambda_i$. Выбор этих параметров может быть произвольным, и каждый раз они будут соответствовать правилам анализа размерностей. На практике эти параметры подбирают, исходя из лучшей аппроксимации опытных данных.

Если примем $c_2 = c_3 = \dots = c_n = 0$, $\alpha_i = \delta_i = \lambda_i = 0$, $\gamma_i = 1$, то получим простейшую эмпирическую формулу:

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = c_1 \quad \text{или} \quad \Delta b = c_1 \Delta h. \quad (1.55)$$

Коэффициент c_1 подбирается из опытных данных. Формула справедлива в довольно узких пределах изменения условий прокатки.

Таким образом, метод анализа размерностей позволяет установить обоснованность той или иной эмпирической формулы. Правильная формула должна быть частным случаем выражения (1.53).

Лекция № 4. Моделирование процессов обработки металлов давлением (продолжение)

План

- 1.10. Приближенное моделирование
- 1.10.1. Принципы приближенного моделирования
- 1.10.2. Коэффициенты несоответствия
- 1.10.3. Силовое подобие при растяжении
- 1.10.4. Силовое подобие при осадке

Задания для самоконтроля

1.10. Приближенное моделирование

1.10.1. Принципы приближенного моделирования

Чтобы иметь возможность воспользоваться закономерностями законов подобия, необходимо при физическом моделировании создать условия, при которых обеспечивается геометрическое подобие модели и природы и физическое подобие процессов, протекающих в них при подобной деформации. Теоретически это может быть достигнуто при выполнении критериев подобия. В реальных же условиях моделирования этого не достигается, причем в некоторых случаях отступления от требования теорий подобия довольно существенны.

При моделировании с практически достаточной точностью обеспечиваются [27]:

- *приблизительное геометрическое подобие модели и природы;*
- *приблизительное геометрическое подобие инструмента;*
- *приблизительная одинаковость степени деформации;*
- *химический состав металлов модели и природы относятся к одной марке, но к разным плавкам и типосортаразмерам;*
- *состав материала инструмента модели и качество их поверхности отличаются от натуральных, в связи с чем коэффициенты трения при деформации модели и природы обычно различаются;*
- *условия нагрева (атмосфера печи, длительность нагрева) модели отличаются от условий нагрева природы; температура деформации замеряются только приблизительно;*
- *температуры нагрева и деформация модели полностью не совпадают с температурами нагрева и деформации природы;*
- *скорость деформирования точно не удовлетворяет ни одному из критериев кинематического подобия.*

Таким образом, в реальных условиях постоянство критериев подобия полностью не обеспечивается, в связи с чем на практике моделирование является только приближенным.

Возникает вопрос, в какой мере пригодны для практики искомые параметры исследуемых процессов, полученные при приближенном моделировании?

Приближенное моделирование процессов обработки металлов давлением возможно, а получаемые при таком приближенном моделировании результаты вполне устраивают практику.

Пригодность получаемых при приближенном моделировании результатов для практики проверяется самими данными, т.е. теми данными, которые получаются при натурных исследованиях в производственных условиях. Эти данные даже при современных методах исследования весьма сильно колеблются; при этом погрешность нередко составляет $\pm 15 \dots 25\%$.

Такие значительные колебания данных, получаемых в производственных условиях, определяются очень многими факторами:

- точностью самих измерительных приборов, в первую очередь мсдоз, работающих обычно в тяжелых условиях (перекос, колебания температуры среды);
- точностью показаний приборов, применяемых для замера температур, и индивидуальными особенностями работников, осуществляющих эти замеры;
- колебания и неравномерностью температур нагрева металла;
- колебаниями величин деформации и др.

Все эти факторы не могут не сказаться на искомым параметрах при натурных исследованиях, которые в определенной смысле также являются приближенными. Поэтому различия между значениями, полученными при моделировании, и результатом натурных исследований связали не только с неточностью моделирования, но и с погрешностями самих натурных исследований.

При моделировании должны выполняться многие критерии подобия. Влияние их на процессы различно. Некоторые из критериев, если не соблюдается их постоянство в модели и натуре, влияют на количественные значения искомого параметра процесса настолько незначительно, что таким влиянием можно пренебречь. Очевидно, что несоблюдение этих критериев при моделировании нельзя рассматривать как существенное нарушение условий подобия, хотя по этому критерию моделирование будет только приближенным.

В связи с этим при постановке задачи по моделированию в каждом отдельном случае, если нет возможности выполнить все критерии подобия, необходимо выявить те из них, которые следует предпочесть, т.е. те, которые оказывают наиболее существенное влияние на ход процесса.

Таким образом, можно сформулировать следующие принципы приближенного моделирования:

- 1) на основе общего анализа исследуемого процесса определяют условия подобия и все критерии подобия, характеризующие процесс;
- 2) в зависимости от постановки задачи определяют критерии подобия, которые оказывают наиболее существенное влияние на те параметры процесса, которые необходимо определить при моделировании;
- 3) при невозможности в достаточной мере выполнить наиболее существенные критерии используют соответствующие зависимости, учитывающие отступления от полного подобия.

1.10.2. Коэффициенты несоответствия

Основные зависимости закона подобия при деформации геометрических подобных тел при приближенном моделировании записываются в виде [27]:

$$P_H = P_M \eta_1 m^2; \quad (1.56)$$

$$N_H = N_M \eta m^3, \quad (1.57)$$

где η_1 и η - коэффициенты несоответствия.

Коэффициенты η_1 и η , когда они не равны единице, характеризуют отступления действительных условий при приближенном моделировании от условий, определяемых критериями, обусловленными теорией подобия процесса.

При реальном моделировании отступления от подобия могут быть самыми различными. Они могут определяться несоответствием температуры деформации природы и модели, несоответствием скоростей деформации, геометрических размеров деформируемых тел, степени деформации, природы деформируемых материалов и т.д.

В связи с этим общий коэффициент несоответствия η может быть представлен как произведение частных коэффициентов, каждый из которых отражает несоответствие условий подобия для отдельных параметров процесса:

$$\eta = \eta_t \cdot \eta_v \cdot \eta_\psi \cdot \eta_\mu \cdot \eta_M \dots, \quad (1.58)$$

где η_t , η_v , η_ψ , η_μ , η_M - коэффициенты, учитывающие влияние отступления от полного подобия для соответствующих параметров процесса: температуры, скорости деформации, степени деформации, трения, природы деформируемого материала и т.д.

Чтобы определить силовые параметры процессов обработка давлением при приближенном моделировании в условиях, когда имеются отступления от требований, вытекающих из теории подобия, при которых коэффициент несоответствия η отличается от единицы, необходимо иметь возможность во всех случаях определять его значение. Точное определение коэффициентов несоответствия - задача довольно сложная, поскольку их величина зависит от целого ряда факторов, влияющих на процессы. Вместе с тем в ряде случаев нет необходимости в их точном определении, так как вполне удовлетворительные для практики решения получаются и при использовании приближенных значений коэффициентов несоответствия.

1.10.3. Силовое подобие при растяжении

Действие закона подобия при деформации растяжением изучали следующим образом [27]. Были изготовлены стальные образцы трех типов, различающиеся по размерам, но имевшие одинаковое отношение расчетной длины образца к его диаметру:

Таблица 1 - Типоразмеры образцов

Тип образца	I	II	III
Диаметр, d, мм	6	10	60
Расчетная длина, мм	30	50	300

Масштабы m и показатели m^2 подобия в этом исследовании были равны:

$m_1 = 10/6 = 1,66$; $m_1^2 = 2,76$; $m_2 = 60/6 = 10$; $m_2^2 = 100$; $m_3 = 60/10 = 6$; $m_3^2 = 36$.

Образцы растягивали при 20 и 900°C со скоростью 2...6 мм/мин (скорость деформации составляла примерно $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$). Для нагрева образца на машинах устанавливали электрические печи.

Условно принимаем образец типа I за модель.

По закону подобия разрушающее усилие натуре

$$P_H = m^2 P_M.$$

Тогда для образца типа II и III разрушающие усилия должны быть:

$$P_2 = m_1^2 P_1 \quad P_3 = m_2^2 P_1 \quad P_3 = m_3^2 P_2.$$

В последнем случае за модель принят образец типа II. В действительности для стали марки Ст. 3 нашли: $m_1^2 = 2,74$, $m_2^2 = 80,5$ и $m_3^2 = 29,5$. Показателя подобия m_2^2 и m_3^2 примерно на 20...22% меньше показателей, рассчитанных по закону подобия.

Придел прочности по закону подобия для натуре и модели должен быть одинаковым, в опытах же для стали марки Ст. 3 при масштабах моделирования 1:6 и 1:10 разница достигла 18%.

При растяжении образцов из стали 45 получили следующие значения:

$$m_1^2 = 2,72, \quad m_2^2 = 104,0 \text{ и } m_3^2 = 38,4.$$

Отношения пределов прочности оказались соответственно равными 0,99; 1,05 и 1,05 (вместо 1,0).

При горячем растяжении образцов показатели подобия по разрушающему усилию получилась соответственно равными: $m_1^2 = 2,82$, $m_2^2 = 97,2$ и $m_3^2 = 34,6$.

Разница пределов прочности, полученных при растяжении этих образцов, не превышала 2%.

Полученные данные, таким образом, показывают, что при растяжении образцов, когда масштаб подобия изменяется в пределах от 1,66 до 10, закон пластического подобия выполняется с достаточно удовлетворительной точностью.

1.10.4. Силовое подобие при осадке

Осадке подвергали цилиндрические образцы из чистого алюминия при комнатной температуре как при сухом трении (плиты пресса и поверхность образцов протирали ацетоном), так и со смазкой касторовым маслом [12, 27].

Осадку осуществляли на прессах со скоростью 0,2 мм/с. По достижению заданной степени деформации процесс сжатия прекращали и фиксировали достигнутое давление. После измерения образцов их вновь сжимали. Суммарная степень деформации достигала 87%. Из рис. 1.2 видно, что полученные кривые зависимости усилия осадки от степени деформации качественно одинаковы.

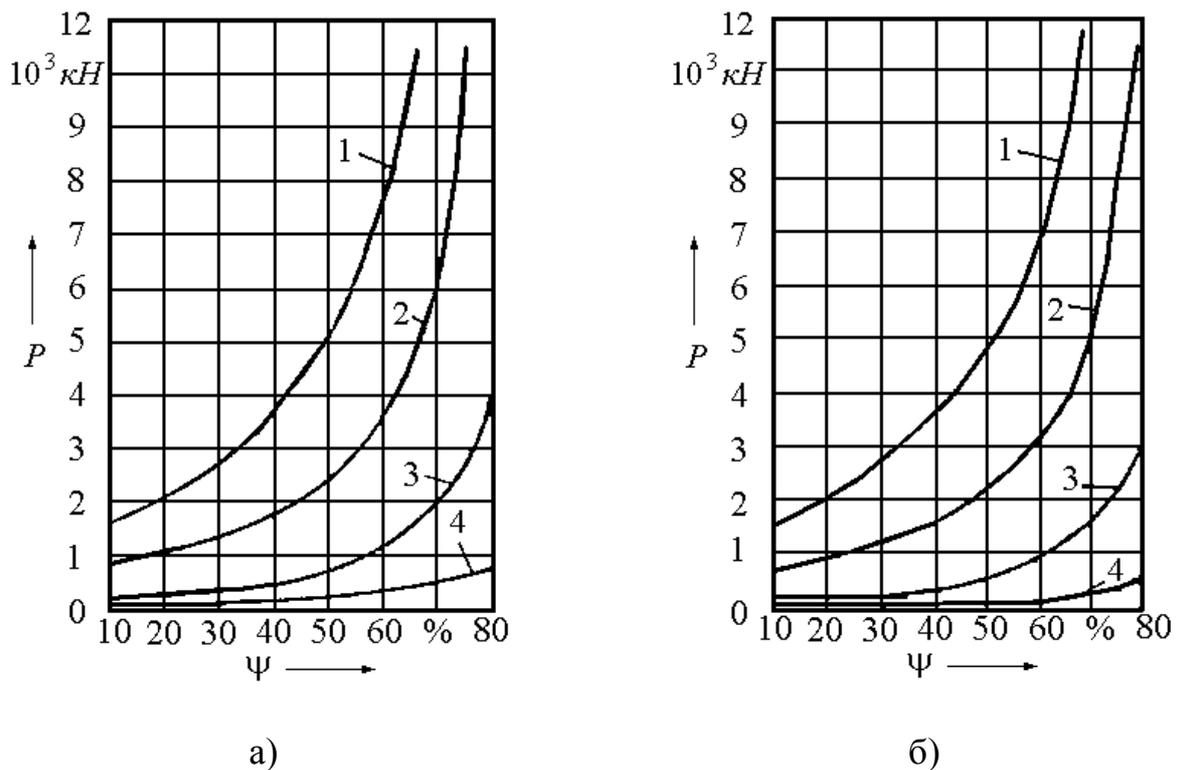


Рис. 1.2. Зависимость усилия осадки P от степени деформации ψ для цилиндрических образцов из алюминия: а - без смазки; б - со смазкой касторовым маслом; 1 – $H = d = 147$ мм; 2 – $H = d = 100$ мм; 3 - $H = d = 50$ мм; 4 - $H = d = 33$ мм

Для дальнейшего анализа по опытным кривым составили табл. 1.2, в которой приведены значения усилия при различных условиях моделирования, а также отношения соответствующих величин при разных масштабах моделирования. Здесь P_1 - усилие для образца размером 20×20 мм; P_2 - для образца 50×50 мм, P_3 - для образца 100×100 мм; P_4 - для образца 147×147 мм (диаметр \times высота).

Таблица 1.2 - Усилие осадки и их отношения при осадке алюминиевых образцов

Степень деформации, %	Усилия, кН				P_2/P_1	P_3/P_1	P_4/P_1	P_3/P_2	P_4/P_2	P_4/P_3
	P_1	P_2	P_3	P_4						
Без смазки										
10	28	170	720	1500	6,1	25,7	53,5	4,25	8,80	2,08
20	38	240	1020	2000	6,35	26,7	52,5	4,25	8,35	1,98
30	58	320	1280	2700	6,40	25,6	54,0	4,00	8,45	2,11
40	68	430	1660	3500	6,30	24,4	51,5	3,96	8,15	2,11
50	95	600	2400	5000	6,23	25,0	52,6	4,00	8,35	2,09
60	140	900	3640	7500	6,42	26,0	53,6	4,05	8,35	2,06
70	260	1670	6860	13300	6,45	26,4	51,4	4,12	7,95	1,94
80	650	3900	-	-	6,00	-	-	-	-	-
	среднее				6,30	25,7	52,7	4,09	8,33	2,05

Степень деформации, %	Усилия, кН				P ₂ /P ₁	P ₃ /P ₁	P ₄ /P ₁	P ₃ /P ₂	P ₄ /P ₂	P ₄ /P ₃
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄						
Сказка – касторовое масло										
10	26,0	160	700	1420	6,15	27,0	54,7	3,90	7,90	2,03
20	40	230	1000	2000	5,75	25,0	50,0	4,35	8,7	2,00
30	50	300	1250	2680	6,00	25,0	53,6	4,15	8,9	2,15
40	70	400	1650	3500	5,75	23,6	50,0	4,10	8,8	2,12
50	90	530	2250	4750	5,90	25,0	52,6	4,30	9,0	2,11
60	130	750	3150	6500	5,80	24,2	50,0	4,20	8,7	2,08
70	220	1200	5000	11000	5,50	22,8	50,0	4,20	8,2	2,10
80	530	2950	11500		5,6	-	—	3,90	-	-
среднее					5,9	24,7	51,5	4,14	8,6	2,08

Таким образом, полученные опытные данные убедительно показывают, что при сжатии образцов, когда масштаб подобия, изменяясь от 1,5 до 8,65, закон подобия выполняется с достаточной для практики точностью.

Масштабы и показатели подобия в этом исследовании были равны:

$$m_1 = 50/20 = 2,5; \quad m_1^2 = 2,5^2 = 6,25; \quad m_2 = 100/20 = 5; \quad m_2^2 = 5^2 = 25;$$

$$m_3 = 147/20 = 7,35; \quad m_3^2 = 7,35^2 = 54; \quad m_4 = 100/50 = 2,0; \quad m_4^2 = 2^2 = 4;$$

$$m_5 = 147/50 = 2,94; \quad m_5^2 = 2,94^2 = 8,65; \quad m_6 = 147/100 = 1,47; \quad m_6^2 = 1,47^2 = 2,16.$$

Задания для самоконтроля

1. *Какие вопросы позволяет изучать моделирование на основе теории подобия?*
2. *Изложите содержание первой теоремы подобия.*
3. *Что вкладывают в понятие критериев подобия?*
4. *Сформулируйте сущность второй теоремы подобия.*
5. *Расскажите об основном содержании «π-теоремы».*
6. *Сформулируйте третью теорему подобия.*
7. *Расскажите, каким образом могут быть получены критерии подобия.*
8. *Перечислите, какие уравнения и соотношения входят в полную систему дифференциальных уравнений теории пластического течения Леви-Мизеса.*
9. *Сформулируете граничные условия при моделировании операции осадки.*
10. *Какие точки называются сходственными точками природы и модели?*
11. *Как связаны между собой усилие осадки природы и модели?*
12. *Расскажите, каким образом можно пересчитать мощность процесса осадки природы, если известна мощность осадки модели?*

13. *Перечислите особенности моделирования скоростных процессов холодной пластической деформации?*
14. *Возможно ли моделирование скоростных процессов на материале nature?*
15. *Расскажите об особенностях моделирования процессов горячей пластической деформации.*
16. *С какими явлениями связаны критерии подобия горячей штамповки?*
17. *Какие условия опыта Вы должны выполнить, чтобы осуществить приближенный модельный эксперимент по горячей деформации на одном материале?*
18. *Перечислите основные положения теории размерностей.*
19. *Приведите пример использования метода анализа размерностей.*
20. *Расскажите об этапах метода анализа размерностей.*
21. *Дайте пояснения об определении критериев подобия методом анализа размерностей на примере задачи расчета уширения металла при его прокатке между валками.*
22. *Перечислите принципы приближенного моделирования процессов обработки металлов давлением.*
23. *В какой мере пригодны для практики искомые параметры исследуемых процессов, полученные при приближенном моделировании?*
24. *Дайте понятие коэффициента несоответствия.*
25. *Расскажите о силовом подобии при растяжении.*
26. *Расскажите о силовом подобии при осадке.*

Лекция № 5. Геометрические методы исследований деформированного состояния. Метод делительных сеток

План

- 2.1. Постановка задачи и основные предположения
- 2.2. Геометрические методы исследования деформированного состояния
- 2.3. Выбор базы сеток. Точность нанесения и измерения делительной сетки
- 2.4. Способы обработки искаженной делительной сетки
- 2.4.1. Методы конечных деформаций

Развитие машиностроения и металлообработки происходит в направлении увеличения удельного веса обработки металлов давлением и повышения роли кузнечно-штамповочного производства. Широкое применение процессов обработки металлов давлением в промышленности позволяет получать заготовки и изделия высокой точности с заданными механическими свойствами при высокой производительности и низкой себестоимости.

Перед кузнечно-штамповочным производством поставлены задачи по созданию новых, прогрессивных технологических процессов и высокопроизводительных кузнечно-прессовых машин, интенсификации производства, экономии материала и повышению качества продукции. Выполнение этих задач немыслимо без развития и совершенствования теоретических и экспериментальных методов исследования процессов пластического формоизменения металлов.

Теоретические методы исследования базируются на прикладной теории пластичности. При этом реальные процессы обработки металлов давлением схематизируются, а реальные свойства материалов идеализируются. Часто результаты теоретического анализа не позволяют полностью ответить на целый ряд вопросов, которые ставит практика перед технологами и конструкторами, занимающимися штамповкой. Следует отметить, что во многих случаях в силу значительных математических трудностей не представляется возможным получить теоретические решения, поэтому встает задача одновременного развития и экспериментальных методов исследования, позволяющих получить практические решения наиболее важных проблем пластического формоизменения металла, а также проверить, если это необходимо, теоретическое решение.

В связи с развитием методов исследований изменился круг вопросов, которые интересуют специалистов по обработке металлов давлением. Теперь уже недостаточно получить информацию о потребном усилии процесса, затратах мощности на осуществление той или иной технологической операции. Исследователей и технологов интересуют локальные явления и характеристики процессов. Им нужно знать характер распределения напряжений, особенности пластического течения материала, неравномерность деформаций в любой части пластической области. Накопление таких данных позволяет лучше понять механику протекания процессов, выявить области, наиболее опасные с точки зрения разрушения, оценить неравномерность накопленной деформации и тем самым предсказать ожидаемые механические свойства

готового изделия, получить необходимую информацию для определения силовых и энергетических характеристик процессов.

Экспериментальное исследование влияния технологических параметров процессов обработки металлов давлением на характеристики деформации и напряжений в локальных объемах при перемещении их в пластической области позволяет, в некотором смысле, управлять этими процессами.

Ниже кратко излагаются методы оценки деформированного состояния и неравномерности деформаций в процессах осесимметричного и плоского пластического течения материала при обработке его давлением.

2.1. Постановка задачи и основные предположения

Для оценки локальных и интегральных характеристик деформированного состояния в теле выделяют элементарный объем и следят за перемещением этого объема в пластической области. Оценку деформированному состоянию дают по изменению размеров и формы выделенного объема (по перемещениям характерных точек) или же по изменению физико-механических свойств материала этого объема в процессе деформации. В первом случае методы изучения деформированного состояния называются геометрическими. Обычно предполагается, что тело изотропно, а деформация в пределах выделенного объема однородна. Если размеры, характеризующие выделенный элементарный объем, малы, то полученные средние параметры формоизменения в этом объеме могут быть отнесены к центру его и рассматриваться как локальные.

Размеры выделенного объема должны быть выбраны такими, чтобы полученная информация была достаточно надежной для оценки локальной деформации. Чем меньше размеры выделенного объема, тем с большим основанием можно отнести полученные характеристики деформированного состояния к центру ячейки и повысить точность определения локальных характеристик. С другой стороны, выбор очень малых размеров объемов может привести к проявлению микронеоднородности и микроанизотропии зерен кристаллического тела и уменьшению точности измерения размеров объема, что вызовет погрешность оценки характеристик деформированного состояния. Поэтому важное значение имеет правильный выбор оптимальных размеров выделенного элементарного объема.

Осесимметричное и плоское пластическое течения материала в процессах обработки металлов давлением характеризуются тем, что в теле можно выделить главные плоскости деформаций (скоростей деформаций), которые в процессе деформирования заготовки не искажаются. Это обстоятельство позволяет произвести оценку деформированного состояния по перемещению характерных точек или по изменению механических и физических свойств материала плоской элементарной фигуры, выделенной в этой плоскости.

Основная задача анализа деформированного состояния – установить величины главных деформаций (скоростей деформаций), определить направление главных осей, вычислить накопленную интенсивность деформаций в любой точке пластической области деформируемого тела в процессе пластического формоизменения.

2.2. Геометрические методы исследования деформированного состояния

Все экспериментальные геометрические методы изучения деформированного состояния при пластическом формоизменении можно разделить на три группы:

- 1) *методы конечных деформаций;*
- 2) *поэтапные методы исследования;*
- 3) *методы течения.*

Первая группа методов базируется на деформационной теории пластичности. Основные характеристики локального формоизменения определяются путем сопоставления конечной и начальной форм и размеров выделенного элементарного объема. Принимается, что элементарная сфера в результате деформации превращается в эллипсоид, главные оси которого определяют направление главных осей деформаций. Главные компоненты деформаций определяются как натуральные логарифмы отношений главных диаметров эллипсоида к диаметру исходной сферы. Принимается, что направление главных осей напряжений совпадает с направлением главных осей конечных деформаций. Интенсивность накопленной деформации сдвига определяется значениями главных компонентов конечных деформаций e_1 , e_2 , e_3 по выражению

$$\Gamma = \sqrt{2(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2)} \quad (2.1)$$

и характеризует физическое состояние материала и работу, затрачиваемую на формоизменение.

Вторая группа методов также базируется на деформационной теории. Весь процесс формоизменения разбивается на ряд этапов. На каждом этапе характеристики формоизменения определяются, как и в случае конечных деформаций. Накопленное значение интенсивности сдвиговой деформации Γ получается суммированием этапных значений $\Delta\Gamma_i$:

$$\Gamma = \sum_i \Delta\Gamma_i . \quad (2.2)$$

Направления главных осей деформаций на каждом этапе считают совпадающими с направлениями главных осей напряжений.

Третья группа методов базируется на теории пластического течения. Эти методы основаны на непрерывном наблюдении за изменением формы и размеров элементарного объема, которые рассматриваются как непрерывные функции некоторого параметра (времени, перемещения в пластической области и т.п.). Текущие значения компонентов скоростей деформаций (производных по параметру) определяются в любой стадии процесса в произвольной, но обоснованно выбранной системе координат и используются как для нахождения текущего положения главных осей скоростей деформаций, так и для определения интенсивности скорости деформации $\dot{\Gamma}$ (производных интенсивности деформаций сдвига по параметру $\Gamma'(\lambda)$).

Величина накопленной интенсивности сдвиговой деформации находится интегрированием по параметру

$$\Gamma = \int \Gamma'(\lambda) d\lambda . \quad (2.3)$$

Таким образом, три группы геометрических методов изучения деформированного состояния при пластическом формоизменении отличаются главным образом способом обработки полученной информации.

Первая группа методов пригодна для анализа процессов обработки металлов давлением при монотонном формоизменении, когда главные оси деформаций в течение всего процесса пластического формоизменения совпадают с одними и теми же материальными волокнами, а вид деформированного состояния остается неизменным.

Две другие группы методов позволяют анализировать процессы обработки металлов давлением при немонотонном формоизменении в условиях сложного нагружения. Следует отметить, что третья группа геометрических методов изучения деформированного состояния предпочтительнее других, так как дает более надежную информацию о физическом состоянии тела и затраченной работе деформации.

2.3. Выбор базы сетки. Точность нанесения и измерения делительной сетки

Условие однородности деформации в пределах ячейки делительной сетки выполняется тем точнее, чем меньше размеры базы сетки. С другой стороны, уменьшение базы сетки повышает требования к точности измерения, а также приводит к влиянию структурной микронеоднородности. Исследования, выполненные под руководством И.П. Ренне, показали [16, 17, 19], что точность определения локальных деформаций с уменьшением базы сетки резко снижается. Минимальные размеры ячейки не должны быть меньше 0,2...0,3 мм. В этом случае влияние структурной неоднородности мало. При такой базе сетки требования к точности нанесения и измерения остаются высокими. Обычно размеры ячейки делительной сетки выбираются в соответствии с размерами исследуемой пластической области. При значительных деформациях, когда квадратная сетка превращается в сильно вытянутый параллелограмм, целесообразно за исходную ячейку принимать прямоугольник, высота которого в направлении течения меньше ширины. Такая форма ячейки в этом случае оказывается более удобной, чем квадратная.

Точность нанесения делительной сетки тем выше, чем больше увеличение и меньше цена деления оптического измерительного устройства, используемого для нанесения сетки. Так, если ведется отсчет по окулярам микроскопа УИМ-21 (x 30), точность шага сетки обеспечивается с отклонением $\pm (1,5...2)$ мк, а при отсчете по компоратору прибора ПМТ-3 (x 130 и x 487) с отклонением $\pm (0,75...1)$ мк.

Высокая точность измерения обеспечивается правильной геометрической формой риски. При значительных деформациях правильная геометрическая форма риски теряется, центральная линия риски (след острия индентора) размывается и четко не просматривается, что приводит к заметному снижению точности измерения деформированной сетки. Точность измерения становится тем ниже, чем шире риска и больше угол при вершине индентора. Поэтому продольные риски (совпадающие с направлением течения материала) можно наносить обычным индентором прибора ПМТ-3 с углом при вершине 135° , а поперечные (расширяющиеся при деформации) – специальным индентором с углом при вершине 60° . Исследования, проведенные И.П. Ренне с сотрудниками кафедры технологии штамповочного производства, показали, что точность измерения координат узловых точек искаженной в результате деформации сетки практически не зависит от увеличения в пределах 30...130. Абсолютная погрешность измерения линейного размера составляет $\pm (3...6)$ мк.

Лекция № 6. Геометрические методы исследований деформированного состояния. Метод делительных сеток (продолжение)

План

- 2.4. Способы обработки искаженной делительной сетки
 - 2.4.1. Методы конечных деформаций
 - 2.4.1.1. Метод Зибеля
 - 2.4.1.2. Метод П.О. Пашкова
 - 2.4.2. Поэтапные методы исследования
 - 2.4.2.1. Модернизированный метод П.О. Пашкова
 - 2.4.2.2. Метод визиопластичности
 - 2.4.3. Методы течения. Метод И.П. Ренне
- 2.5. Совершенствование способа обработки искаженной делительной сетки при исследовании пластического формоизменения

Задания для самоконтроля

2.4. Способы обработки искаженной делительной сетки

2.4.1. Методы конечных деформаций

2.4.1.1. Метод Зибеля

Пусть имеется исходная квадратная сетка, нанесенная в главной плоскости деформируемого тела. Впишем в нее окружность. При деформации окружность превращается в эллипс. Если в течение процесса деформации оси квадрата совпадают с главными осями, то квадрат станет прямоугольником, а вписанная в него окружность – эллипсом, оси которого совпадают с осями прямоугольника и главными осями. Если же в процессе деформации изменится направление главных осей, которые в начальный момент совпадают с осями квадрата, то квадрат превратится в параллелограмм, а окружность – в эллипс, направление осей которого совпадает с новым направлением главных осей (рис. 2.1).

Величины главных истинных деформаций можно определить по формулам

$$e_1 = \ln \frac{a}{a_0} ; e_2 = \ln \frac{b}{a_0} ; e_3 = -e_1 - e_2 , \quad (2.4)$$

а интенсивность деформации сдвига – по формуле

$$\Gamma = 2\sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_1 e_2} , \quad (2.5)$$

где $2a_0$ - диаметр вписанной в квадрат окружности (сторона квадрата); a и b - полуоси эллипса, вписанного в параллелограмм деформированной сетки.

После возведения этих выражений в квадрат, приведения подобных членов и извлечения корня, окончательно будем иметь

$$a = \sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4a_1^2 b_1^2 \sin^2 \delta}}; \quad (2.15)$$

$$b = \sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4a_1^2 b_1^2 \sin^2 \delta}}. \quad (2.16)$$

Величины главных деформаций e_1, e_2, e_3 определим по выражениям

$$e_1 = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{a}{a_0} \right)^2 = \frac{1}{2} \ln \frac{a_1^2 + b_1^2 + \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4a_1^2 b_1^2 \sin^2 \delta}}{2a_0^2}; \quad (2.17)$$

$$e_2 = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{b}{a_0} \right)^2 = \frac{1}{2} \ln \frac{a_1^2 + b_1^2 - \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4a_1^2 b_1^2 \sin^2 \delta}}{2a_0^2}; \quad (2.18)$$

$$e_3 = -e_1 - e_2. \quad (2.19)$$

Найдем угол α . Так как $\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg}(\delta - \alpha) = \frac{\operatorname{tg} \delta - \operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \alpha}$, то с помощью выражения

(2.6) получим уравнение для определения α :

$$\operatorname{tg}^2 \alpha - \operatorname{tg} \delta \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \operatorname{tg} \alpha + \frac{b^2}{a^2} = 0.$$

Решение этого уравнения приводит к выражению

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \operatorname{tg} \delta - \sqrt{\frac{1}{4} \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right)^2 \operatorname{tg}^2 \delta - \frac{b^2}{a^2}}. \quad (2.20)$$

2.4.1.2. Метод П.О. Пашкова

Этот метод основан на сопоставлении квадратной ячейки до деформации и ячейки в виде параллелограмма после деформации с использованием свойства экстремальности главных деформаций. Пусть квадратная ячейка, нанесенная в главной плоскости, превращается в параллелограмм со сторонами a_1 и b_1 и углом δ_1 между ними (рис. 2.2).

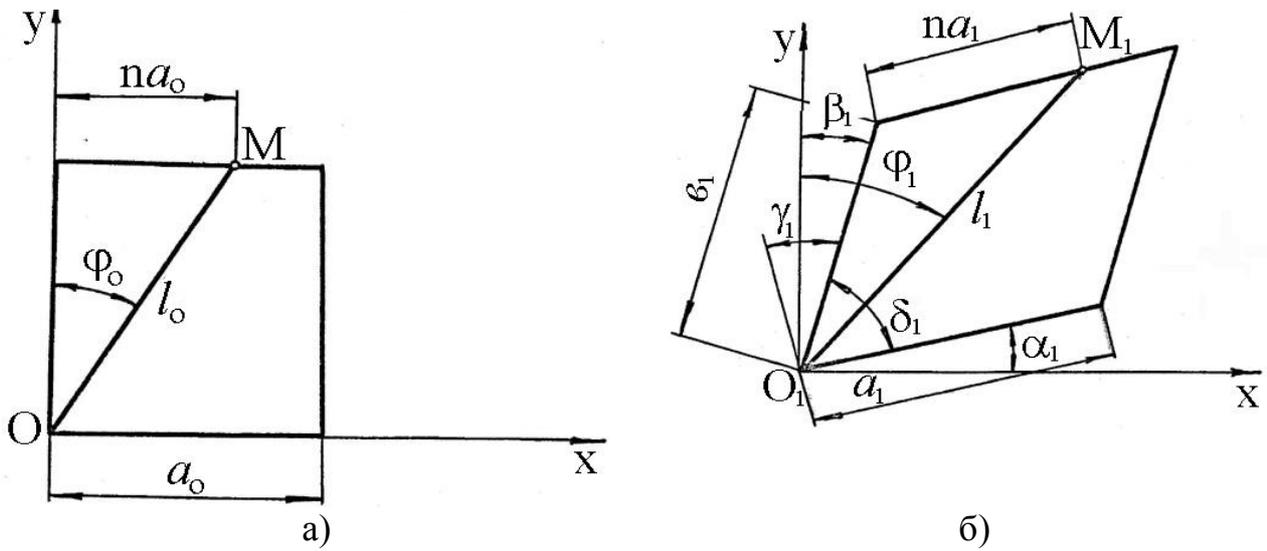


Рис. 2.2

Поворот сторон относительно системы координат XY характеризуется углами α_1 и β_1 . Отрезок OM , имеющий до деформации длину l_0 , определяемую выражением

$$l_0^2 = a_0^2 + n^2 a_0^2 = (1 + n^2) a_0^2, \quad (2.21)$$

и ориентацию, связанную с величиной n , после деформации будет иметь длину l_1 и новую ориентацию, определяемую углом φ_1 :

$$l_1^2 = b_1^2 + n^2 a_1^2 + 2a_1 b_1 n \cos \delta_1; \quad (2.22)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{b_1 \sin \beta_1 + n a_1 \cos \alpha_1}{b_1 \cos \beta_1 + n a_1 \sin \alpha_1}, \quad (2.23)$$

где $\delta_1 = \frac{\pi}{2} - \gamma_1$.

По условию однородности деформации и монотонности процесса величина n считается постоянной.

Деформация отрезка OM , определяемая по выражению

$$e = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{l_1}{l_0} \right)^2 = \frac{1}{2} \ln \frac{b_1^2 + n^2 a_1^2 + 2n a_1 b_1 \cos \delta_1}{(1 + n^2) a_0^2}, \quad (2.24)$$

в общем случае не является главной. Используя свойство экстремальности главных деформаций, найдем значения n , определяющие положение главных осей:

$$\frac{\partial e}{\partial n} = 0; \quad n_{1,2} = \frac{a_1^2 - b_1^2 \pm \sqrt{(a_1^2 - b_1^2)^2 + 4a_1^2 b_1^2 \cos^2 \delta_1}}{2a_1 b_1 \cos \delta_1}, \quad (2.25)$$

Подставляя значения n_1 и n_2 в уравнение (2.24), получаем

$$e_{1,2} = \frac{1}{2} \ln \frac{a_1^2 + b_1^2 \pm \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4a_1^2 b_1^2 \sin^2 \delta_1}}{2a_0^2} \Bigg\} \quad (2.26)$$

$$e_3 = -e_1 - e_2,$$

т.е. результат, тождественный полученному по методу Зибеля.

Направление главных осей и интенсивность деформации сдвига определяют соответственно по выражениям (2.23) и (2.5).

2.4.2. Поэтапные методы исследования

2.4.2.1. Модернизированный метод П.О. Пашкова

Изложенный выше метод П.О. Пашкова не пригоден для оценки деформаций при поэтапном исследовании, так как он основан на преобразовании начальной квадратной ячейки в параллелограмм. И.П. Ренне обобщил этот метод на случай, когда начальная ячейка есть параллелограмм. Это позволило применить модернизированный метод П.О. Пашкова для поэтапного исследования процесса пластического формоизменения.

Рассмотрим элемент в виде параллелограмма до и после малого этапа деформации (рис. 2.3).

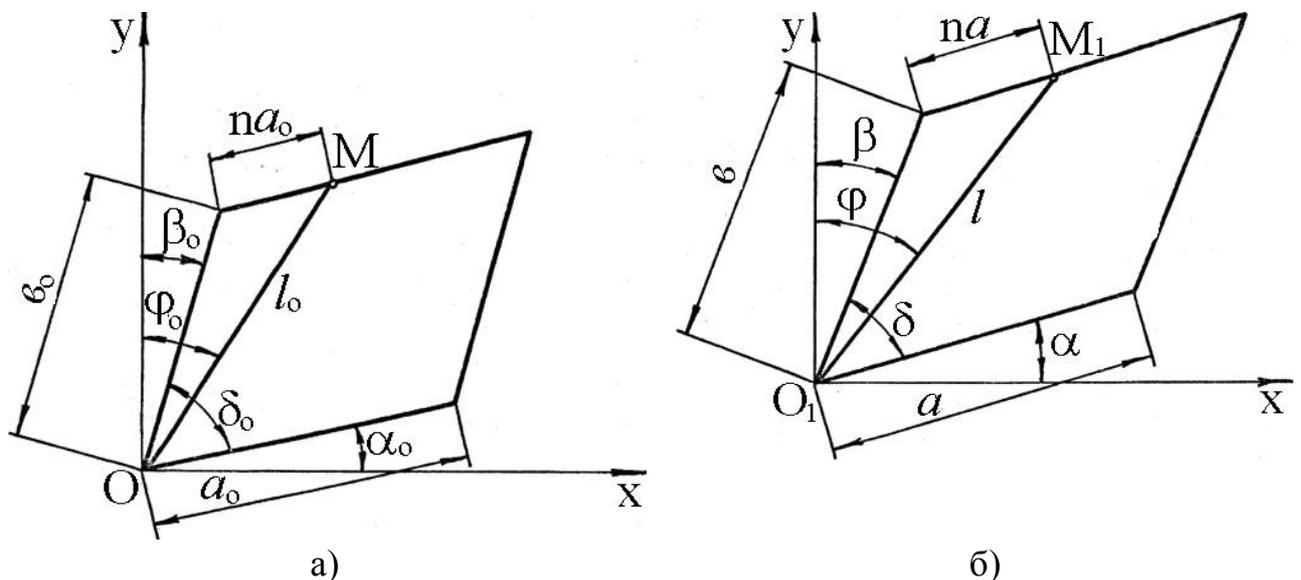


Рис. 2.3

Отрезок прямой OM , имеющей длину l_0 и ориентацию в системе координат X, Y , определяемую углом φ_0 , после этапа деформации изменяет свою длину до величины l и занимает новое положение O_1M_1 , определяемое углом φ . Положение

сторон ячейки до и после этапа деформации фиксируется относительно системы координат X, Y величинами углов α_0, β_0 и α, β .

Из геометрических соображений находим

$$l_0^2 = b_0^2 + n^2 a_0^2 + 2na_0 b_0 \cos \delta_0; \quad (2.27)$$

$$l^2 = b^2 + n^2 a^2 + 2nab \cos \delta; \quad (2.28)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{b_0 \sin \beta_0 + na_0 \cos \alpha_0}{b_0 \cos \beta_0 + na_0 \sin \alpha_0}; \quad (2.29)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b \sin \beta + na \cos \alpha}{b \cos \beta + na \sin \alpha}. \quad (2.30)$$

Деформацию отрезка OM определим по выражению

$$e = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{l}{l_0} \right)^2 = \frac{1}{2} \ln \frac{b^2 + n^2 a^2 + 2abn \cos \delta}{b_0^2 + n^2 a_0^2 + 2a_0 b_0 n \cos \delta_0}. \quad (2.31)$$

В общем случае деформация, определяемая выражением (2.31), не является главной. Используя свойство экстремальности главных деформаций, можно найти значения n , определяющие положение главных осей:

$$\frac{\partial e}{\partial n} = 0; \quad An^2 - Bn - C = 0; \quad (2.32)$$

$$n_{1,2} = \frac{B \pm \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A}, \quad (2.33)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A &= a_0 b_0 a^2 \cos \delta_0 - a b a_0^2 \cos \delta; \\ B &= a_0^2 b^2 - a^2 b_0^2; \\ C &= a_0 b_0 b^2 \cos \delta_0 - a b b_0^2 \cos \delta. \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

Направление главных осей в исходном и деформированном состояниях будет найдено по выражениям (2.29) и (2.30) после подстановки найденных величин n_1 и n_2 . Главные деформации e_1 и e_2 определяются по формуле (2.31) после подстановки величин n_1 и n_2 . Интенсивность деформации сдвига Γ находится по формуле (2.5). Такое обобщение формул П.О. Пашкова оказывается весьма удобным при поэтапном изучении процесса формоизменения.

2.4.2.2. Метод визиопластичности

Метод визиопластичности разработан Томсеном, Фришем и Янгом и применен к анализу процесса обратного выдавливания прутков и труб (рис. 2.4) в стационарной стадии пластического течения [10].

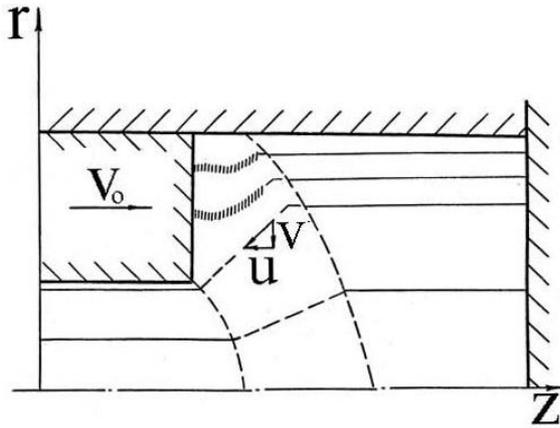


Рис. 2.4

Метод дает возможность определить компоненты скоростей течения, траектории перемещения элементарных объемов деформированного тела (частиц металла), скорости деформаций и накопленную интенсивность деформаций в каждой точке пластической области. Исходной деформацией для этого служит экспериментально установленное поле смещений элементарных объемов деформированного тела на каждом фиксированном по времени этапе деформирования.

В плоскости симметрии деформируемого тела (в меридиональной плоскости) наносилась квадратная сетка. После каждого малого этапа деформации искаженная сетка фотографировалась. Негативы фотографий проектировались на миллиметровую бумагу с увеличением в десять раз и вычерчивалось мгновенное положение точек пересечения (узлов) линий сетки. На основании этого получали траектории частиц металла. Одновременное измерение перемещения частиц за соответствующий этап деформации и времени этапа дает возможность найти величину и направление скорости.

Компоненты скорости деформаций определили с помощью уравнений линейной теории деформаций. В цилиндрической системе координат r , θ , z компоненты скоростей деформаций при стационарном и пластическом течении материала находили по формулам

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_z &= \frac{\partial u}{\partial z}; \dot{e}_r = \frac{\partial V}{\partial r}; \\ \dot{\gamma}_{zr} &= \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial z}; \dot{e}_\theta = -\dot{e}_z - \dot{e}_r, \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

где u и V - компоненты скорости частицы в направлении осей z и r соответственно.

Накопленная интенсивность линейных деформаций может быть определена по выражению

$$e_i = \sum_0^t \ln(1 + \dot{e}_i \Delta t), \quad (2.36)$$

где e_i - интенсивность скоростей линейных деформаций,

$$\dot{e}_i = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\dot{e}_z - \dot{e}_r)^2 + (\dot{e}_r - \dot{e}_\theta)^2 + (\dot{e}_\theta - \dot{e}_z)^2 + \frac{3}{4} \dot{\gamma}_{zr}^2 \right]}. \quad (2.37)$$

Суммирование производится по времени вдоль линий тока.

Направление главных осей скоростей деформаций в любой точке пластической области находим по формуле

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{\dot{\gamma}_{zr}}{\dot{e}_z - \dot{e}_r}, \quad (2.38)$$

где φ - угол, который составляет направление главной скорости деформации с осью z .

Следует отметить, что использование уравнений линейной теории малых деформаций (2.35) вносит в определение накопленной деформации и направления осей главных скоростей деформации ошибку неопределенной величины в силу неучета вращения окрестности точки как жесткого целого.

2.4.3. Методы течения. Метод И.П. Ренне

Для анализа процессов установившегося пластического течения при немонотонном формоизменении широкое применение нашел метод течения И.П. Ренне. Он основан на непрерывном наблюдении за изменением положения и длины двух базовых отрезков делительной сетки, нанесенной в главной плоскости, при ее перемещении в очаге деформации. Метод был использован при экспериментальном изучении стационарных процессов осесимметричного течения при волочении, прессовании и обратном выдавливании.

Рассмотрим сущность метода и основные соотношения.

В любом малом объеме деформируемого тела при немонотонном формоизменении напряженное и деформированное состояния могут быть описаны зависимостями компонентов тензоров напряжений и деформаций от некоторого параметра λ , определяющего процесс формоизменения. Интенсивности линейных и сдвиговых деформаций также являются функциями этого параметра:

$$e_i = e_i(\lambda); \quad \Gamma = \Gamma(\lambda).$$

Они могут быть найдены интегрированием по λ производной интенсивности линейной деформации

$$e_i = \int_{\lambda} \frac{\partial e_i}{\partial \lambda} d\lambda = \int_{\lambda} e'_i(\lambda) d\lambda \quad (2.39)$$

или по производной интенсивности сдвиговой деформации

$$\Gamma = \int_{\lambda} \frac{\partial \Gamma}{\partial \lambda} d\lambda = \int_{\lambda} \Gamma'(\lambda) d\lambda, \quad (2.40)$$

где

$$\Gamma' = \sqrt{2(e'_x{}^2 + e'_y{}^2 + e'_z{}^2) + \gamma'_{xy}{}^2}; \quad e'_i = \frac{\Gamma'}{\sqrt{3}}. \quad (2.41)$$

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 компонентов деформации по параметру, определяющему процесс деформирования, и интегрированию соотношений (2.39) или (2.40) с целью нахождения интенсивности

деформаций. Направления текущих главных осей, лежащих в плоскости делительной сетки, определяются по выражению

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{\gamma'_{xy}}{e'_x - e'_y}. \quad (2.42)$$

При вычислении производных от компонентов деформаций удобно пользоваться подвижной системой координат (x, y) , одна из осей которой связана с направлением одной из сторон ячейки делительной сетки (рис. 2.5). Пусть с отрезком a 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

$$\left. \begin{aligned} a &= a(\lambda), \quad b = b(\lambda); \\ \alpha &= \alpha(\lambda), \quad \gamma = \gamma(\lambda). \end{aligned} \right\} \quad (2.43)$$

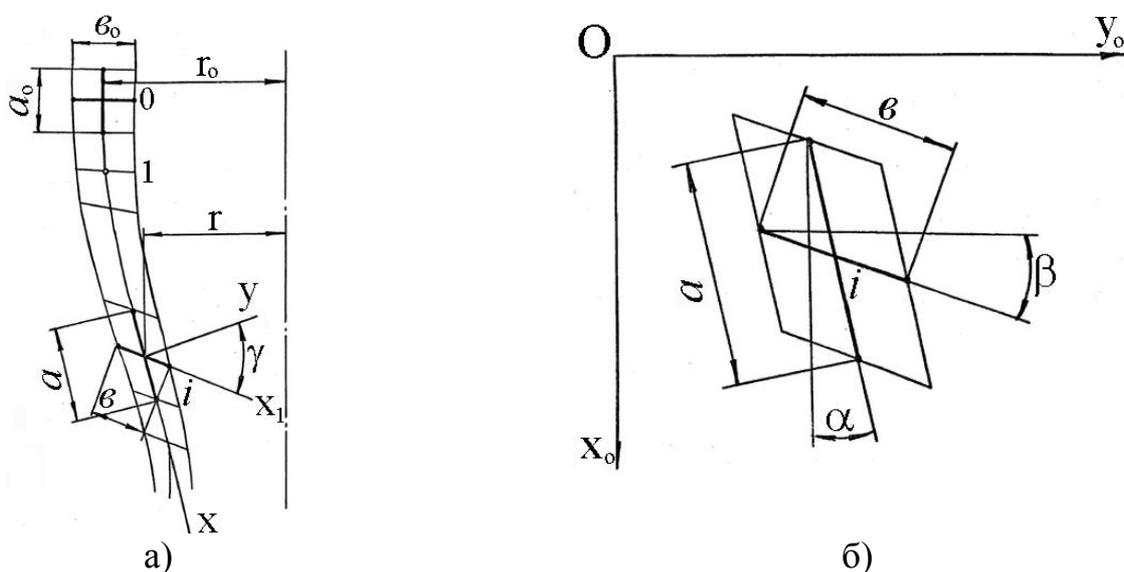


Рис. 2.5

В случае установившихся (стационарных) процессов волочения, прессования и прокатки в качестве параметра можно и удобно выбрать номер ячейки. Изменения длин отрезков и углов в процессе деформирования могут быть представлены в виде графиков или таблиц. Рассмотрим вопрос об определении производных от компонентов деформаций. Пусть нам известны размеры ячейки a и b в какой-то момент деформирования, тогда

$$e_x = \ln \frac{a}{a_0}; \quad e'_x = \frac{a'}{a}. \quad (2.44)$$

Обозначим размеры отрезка, перпендикулярного к главной плоскости в направлении оси z в начальный и рассматриваемый моменты времени, соответственно c_0 и c . В этом случае,

$$e_z = \ln \frac{c}{c_0}; \quad e'_z = \frac{c'}{c}. \quad (2.45)$$

Запишем выражение для элементарного объема, построенного на параллелограмме в основании с высотой c :

$$V = Fc = a(b \cos \gamma)c. \quad (2.46)$$

Относительное изменение элементарного объема определим по выражению

$$\frac{V'}{V} = \frac{c'}{c} + \frac{a'}{a} + \frac{(b \cos \gamma)'}{b \cos \gamma} = 0. \quad (2.47)$$

Сопоставляя полученное выражение с выражением для первой производной от условия несжимаемости

$$e'_x + e'_y + e'_z = 0 \quad (2.48)$$

и учитывая соотношения (2.44) и (2.45), устанавливаем, что

$$e'_y = \frac{(b \cos \gamma)'}{b \cos \gamma} = \frac{b'}{b} - \gamma' \operatorname{tg} \gamma. \quad (2.49)$$

Таким образом, для производных от компонентов деформаций по периметру получаем выражения

$$e'_x = \frac{a'}{a}; e'_y = \frac{b'}{b} - \gamma' \operatorname{tg} \gamma; e'_z = -e'_x - e'_y, \quad (2.50)$$

в которые входят величины линейных и угловых характеристик деформируемой ячейки и производные от них. Для определения производной от компоненты сдвиговой деформации γ'_{xy} воспользуемся формулами преобразования компонентов

скорости деформации при повороте осей x , y вокруг оси z на угол $\frac{\pi}{2} - \gamma$. В этом случае ось x совпадает с отрезком b . Поэтому, с одной стороны,

$$e'_{x_1} = \frac{b'}{b}, \quad (2.51)$$

а, с другой,

$$e'_{x_1} = e'_x \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \gamma \right) + e'_y \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} - \gamma \right) + \gamma'_{xy} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \gamma \right) \sin \left(\frac{\pi}{2} - \gamma \right).$$

Подставим в это выражение значение e'_{x_1} из уравнения (2.51), получим

$$\gamma'_{xy} = \gamma' - \left(\frac{a'}{a} - \frac{b'}{b} \right) \operatorname{tg} \gamma$$

или

$$\gamma'_{xy} = (\operatorname{tg} \gamma)' - (e'_x - e'_y) \operatorname{tg} \gamma. \quad (2.52)$$

Укажем последовательность работ при анализе стационарных процессов обработки металлов давлением:

1) наносится делительная сетка в главной плоскости деформаций. За начальную элементарную ячейку принимается квадрат. В процессе деформирования изменяются координаты узловых точек сетки. Так как процесс стационарный, то остановка процесса в момент реализации стационарной стадии дает полную картину искажения делительной сетки за всю стадию. Каждая ячейка сетки при движении вдоль траектории (линии тока) занимает последовательные положения ячеек;

2) измеряются координаты узловых точек сетки вдоль фиксированных линий тока. По этим координатам определяются размеры a и b сетки и угловые характеристики α , β и γ , равный $\alpha + \beta$ (см. рис. 2.5). Результаты заносятся в табл. 2.1.

Таблица 2.1

λ	a	b	γ	α
λ_0	a_0	b_0	γ_0	α_0
λ_1	a_1	b_1	γ_1	α_1
λ_2	a_2	b_2	γ_2	α_2
...

3) находятся производные от параметров ячейки a , b , γ разностным методом, например:

$$a'_i = \frac{a_{i+1} - a_{i-1}}{2}, \quad (2.53)$$

где i - номер рассматриваемой ячейки;

4) определяются производные от компонентов деформаций по параметру e'_x , e'_y , e'_z , γ'_{xy} с учетом формул (2.50) и (2.52);

5) вычисляются величины производных по номеру ячейки от интенсивности деформаций в каждой точке вдоль линии тока по формуле (2.41);

6) определяется величина накопленной интенсивности сдвиговой деформации по выражению (2.40). Интегрирование выполняется вдоль линии тока по номеру ячейки;

7) находится направление главных осей в текущий момент деформации в каждой точке линии тока в соответствии с уравнением (2.42). Полученная информация достаточна для оценки деформированного состояния в любой точке линии тока.

2.5. Совершенствование способа обработки искаженной делительной сетки при исследовании пластического формоизменения

Обработка искаженной деформацией координатной сетки, нанесенной в главной плоскости пластически деформируемого тела, дает более достоверную информацию о характере напряженно-деформированного состояния по сравнению с другими геометрическими методами исследования в тех случаях, когда выполняется на базе теории течения.

Наиболее совершенным методом обработки искаженной координатной сетки, базирующимся на теории течения, является метод И.П. Ренне [16]. Применение этого метода для анализа процессов развитого пластического течения при обработке металлов давлением было весьма плодотворным.

В настоящее время наибольшие затруднения при обработке координатной сетки возникают в процессе сглаживания экспериментальных данных, обусловленного присутствием систематических и случайных погрешностей при нанесении ис-

ходной и фиксации искаженной сетки и необходимого для достоверного определения значений производных, входящих в зависимости, с помощью которых устанавливаются компоненты и направления главных осей тензора-девиатора скоростей деформации. Суть этих затруднений состоит в отсутствии критерия, который позволил бы оценить правомерность той или иной аппроксимации экспериментальных зависимостей аналитическими выражениями, сглаживающими экстремальные значения экспериментальных зависимостей.

Косвенным критерием проверки справедливости сглаживания может служить сопоставление полученных экспериментальных результатов с результатами теоретических решений. Однако такое сопоставление можно провести лишь в тех редких случаях, когда известны корректные решения конкретных задач (плоское напряженное и плоское деформированное состояния). При анализе осесимметричного и тем более объемного формоизменений такая возможность отсутствует.

Представляет интерес такой способ обработки искаженной длительной сетки, который давал бы возможность уменьшить влияние случайных погрешностей измерения искаженной сетки и оценить справедливость аналитических аппроксимаций, использованных для сглаживания экспериментальных данных. Рассмотрим i -й этап деформирования, на котором в главной плоскости искаженная предыдущей деформацией ячейка формы $i-1$ принимает форму i (рис. 2.6, а).

В общем случае для оценки деформированного состояния в центре ячейки могут быть использованы восемь независимых измерений $0j$ ($j=1,2,\dots,8$).

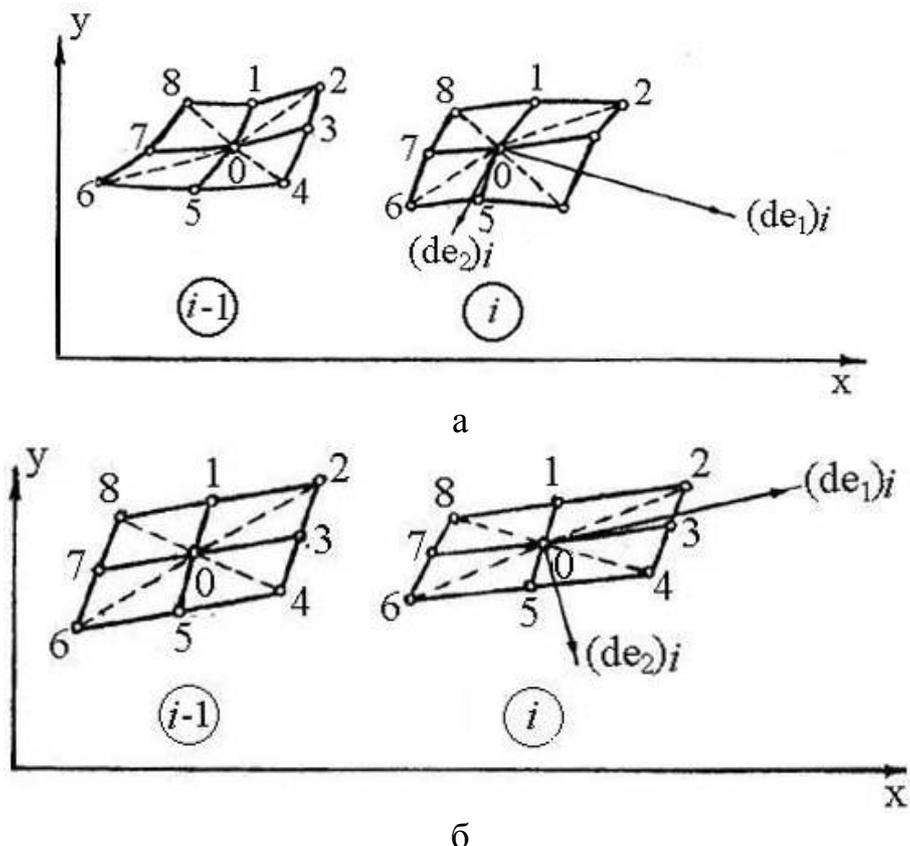


Рис. 2.6

Определим имеющие четкий геометрический и физический смысл характеристики конечных деформаций удлинения на i -м этапе восьми длин oj :

$$(e_{oj})_i = \ln \frac{(l_{oj})_i}{(l_{oj})_{i-1}}, \quad (2.54)$$

где $(l_{oj})_i$ и $(l_{oj})_{i-1}$ - длины отрезков oj , соответствующие формам ячейки i и $i-1$.

Очевидно, определив по выражению (2.54) значения $(e_{oj})_i$ на всех этапах деформирования, характеристики скоростей удлинения в направлениях oj можно установить дифференцированием по параметру i , т.е. по порядковому номеру этапа деформирования:

$$(de_{oj})_i = \frac{\partial (e_{oj})_i}{\partial i} di. \quad (2.55)$$

Укажем, что именно для дифференцирования, предусмотренного выражением (2.55), обычно и производится сглаживание аппроксимирующими функциями зависимостей типа $e_{oj} = e_{oj}(i)$.

Воспользовавшись тензорным преобразованием, выразим значения $(de_{oj})_i$ на i -м этапе деформирования через главные компоненты тензора скоростей деформаций:

$$(de_{oj})_i = (de_1)_i \cos^2(d e_1 \wedge oj)_i + (de_2)_i \sin^2(d e_1 \wedge oj)_i, \quad (2.56)$$

где $(de_1)_i$ и $(de_2)_i$ - главные компоненты тензора скоростей деформации на i -м этапе деформирования; $(d e_1 \wedge oj)_i$ - углы между направлением $d e_1$ и отрезками oj на i -м этапе деформирования.

Введя в рассмотрение угол α между осью X и направлением $d e_1$, преобразуем выражение (2.56):

$$(de_{oj})_i = (de_1)_i \cos^2 \left[\alpha_i - \operatorname{arctg} \left| \frac{Y_0 - Y_j}{X_0 - X_j} \right|_i \right] + (de_2)_i \sin^2 \left[\alpha_1 - \operatorname{arctg} \left| \frac{Y_0 - Y_j}{X_0 - X_j} \right|_i \right]. \quad (2.56, a)$$

Выражение (2.56,а) есть переопределенная система восьми уравнений с тремя неизвестными $(de_1)_i$, $(de_2)_i$, α_i , решение которой приводит к 56 различным значениям каждой из искомым величин. Очевидно, математические ожидания значений $(de_1)_i$, $(de_2)_i$, α_i дают наиболее достоверную информацию о величинах и направлениях главных компонентов тензора скоростей деформаций, а их дисперсии могут служить критерием правильности как фиксации координат искаженной сетки, необходимой для определения значений l_{oj} в выражении (2.54), так и определения частных производных в выражении (2.55), а следовательно, приемлемости использован-

ных при их определении аналитических аппроксимаций, сглаживающих экспериментально установленные зависимости $e_{oj} = e_{oj}(i)$.

Трудоёмкость описанного способа может быть значительно снижена, если пренебречь искривлением рисок делительной сетки (рис. 2.6, б).

В этом случае для оценки деформированного состояния в центре ячейки используются только четыре независимых измерения длин $j, j+4$ ($j=1,2,3,4$). Выражение (2.56, а) в этом случае преобразуется к виду

$$\begin{aligned} (de_{j,j+4})_i = & (de_1)_i \cos^2 \left[\alpha_i - \operatorname{arctg} \left| \frac{Y_j - Y_{j,j+4}}{X_j - X_{j+4}} \right|_i \right] + \\ & + (de_2)_i \sin^2 \left[\alpha_1 - \operatorname{arctg} \left| \frac{Y_j - Y_{j,j+4}}{X_j - X_{j+4}} \right|_i \right] \end{aligned} \quad (2.56, б)$$

и представляет собой переопределённую систему четырех уравнений с тремя неизвестными, решение которой приводит к четырем различным значениям каждой из искомых величин. Аналогично предыдущему математические ожидания искомых величин принимаются за истинные значения величин и направлений главных компонентов тензора скоростей деформаций, а их дисперсии служат критерием правильности фиксации координат узловых точек искаженной делительной сетки и приемлемости аналитических аппроксимаций, использованных для сглаживания экспериментальных зависимостей.

Задания для самоконтроля

1. *Перечислите геометрические методы исследования деформированного состояния.*
2. *На каких теориях базируются геометрические методы исследования деформированного состояния?*
3. *Для анализа каких процессов обработки металлов давлением пригодны изучаемые методы исследования деформированного состояния?*
4. *Расскажите, каким образом осуществляется выбор базы сетки и обеспечивается точность нанесения и измерения делительной сетки.*
5. *Изложите сущность способов обработки искаженной делительной сетки по методу конечных деформаций (метод Зибеля, метод П.О. Пашкова).*
6. *Укажите особенности обработки искаженной делительной сетки при поэтапных методах исследования деформированного состояния.*
7. *Расскажите о методе визиопластичности.*
8. *Изложите основные идеи метода И.П. Ренне.*
9. *Укажите последовательность работ при анализе стационарных процессов обработки металлов давлением.*
10. *Перечислите пути совершенствования способом обработки искаженной делительной сетки при исследовании пластического формоизменения.*

Лекция № 7.

Основы метода муар

- 3.1. Основные понятия
- 3.2. Природа муарового эффекта
- 3.3. Основные свойства муаровых полос
- 3.4. Определение деформированного состояния с помощью муара

Задания для самоконтроля

3.1. Основные понятия

Слово «муар» происходит от названия шелковой ткани, на изгибах которой возникают меняющиеся узоры из светлых и темных полос. В экспериментальной механике муаром называют картину светлых и темных полос, возникающих при наложении растров (систем) – достаточно часто чередующихся прозрачных (белых) и непрозрачных (черных) линий или других геометрических элементов – в тех случаях, когда имеются различия в ширине или ориентации линий растров. Расстояние между двумя соседними одноцветными линиями растра называется шагом растра, а величина, обратная шагу растра и измеряемая числом одноцветных линий растра, расположенных на единице длины, - частотой растра [3, 23, 24, 29].

В отечественной и переводной литературе в качестве синонимов термина «растр» используются термины «сетка» и «решетка», а в качестве синонимов термина «частота» - термины «плотность» и «линиатура».

При исследовании деформаций наиболее широко используются растры с 50%-ной пропускной способностью, т.е. с равной шириной прозрачных и непрозрачных линий. Направление, перпендикулярное к линиям в плоскости растра, называют главным направлением растра, а направление, параллельное линиям, - вторичным направлением. Расстояние между соседними одноцветными муаровыми полосами, возникающими при наложении растров, называют шагом полос.

3.2. Природа муарового эффекта

Рассмотрим картину, возникающую при наложении двух сильно увеличенных растров (рис. 3.1), имеющих различные шаги (p_1 и p_2). Падающий на наложенные растры свет вследствие геометрической интерференции пройдет сквозь них только в тех местах, где совмещаются прозрачные (белые) линии обоих растров (рис. 3.2). Поскольку ширина прозрачных линий, используемых при исследованиях растров, весьма мала (десятые или сотые доли миллиметра), рассеяние света, проходящего через узкие прозрачные щели, приводит к осреднению интенсивности проходящего света, в результате чего наблюдатель воспринимает видимую картину черных и белых чередующихся полос, разделенных серыми областями равномерной освещенности. Очевидно, белые полосы глаз регистрирует в местах наибольшей, а черные полосы - в местах наименьшей освещенности. Наблюдаемая картина носит название муара, а черные и белые полосы, образующие ее, называются муаровыми полосами.

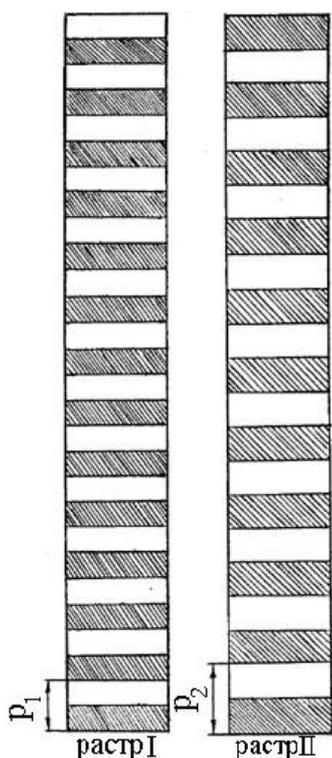


Рис. 3.1

При наложении под углом двух одинаковых растров (рис. 3.3) геометрически возможно возникновение двух муаров, белые полосы которых проходят через обе диагонали белых ромбов.

Однако экспериментально установлено, что наблюдатель воспринимает только один из них, а именно тот, расстояние между полосами которого больше. Этот муар называют эффективным или видимым, а центральные линии его полос задают малыми диагоналями белых ромбов (линии 1 на рис. 3.3). Эффект возникновения видимого муара обусловлен тем, что вследствие рассеяния света и ограниченной разрешающей способности глаза белые ромбы, расположенные вдоль линии I, сливаются в белые полосы, а линии II воспринимаются как черные полосы.



Рис. 3.2

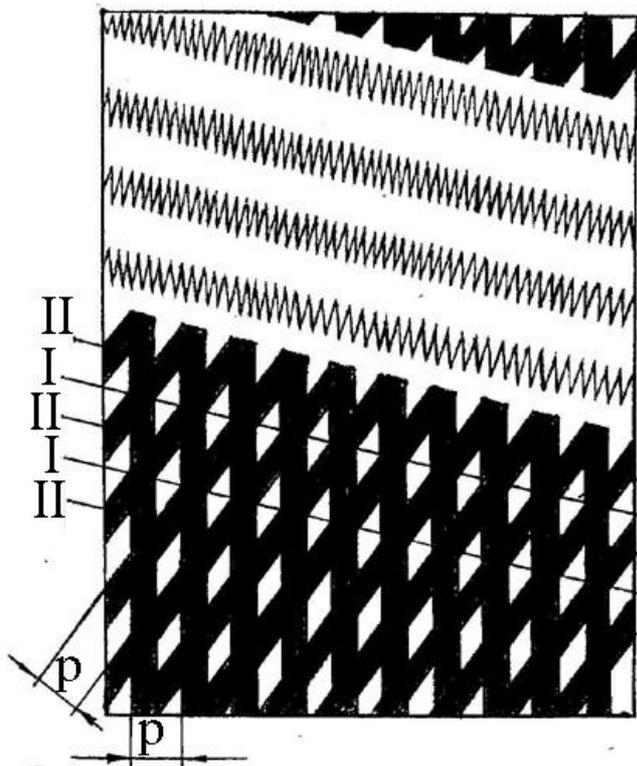


Рис. 3.3

Наибольшее распространение при анализе деформированного состояния получили растры с частотой от 4 до 40 одноцветных линий на миллиметр, т.е. с шагом от 0,75 до 0,025 мм и шириной линий от 0,125 до 0,0125 мм.

3.3. Основное свойство муаровых полос

Рассмотрим процесс образования муара при изгибе консольной балки. Пусть на поверхность недеформированной балки нанесен растр из параллельных оси X линий с шагом p . После изгиба балки, совмещая деформированный растр с контрольным (недеформированным), получаем картину муаровых полос (рис. 3.4). Нетрудно заметить, что полосы муара в то же время есть геометрическое место точек равного вертикального (в направлении Y) перемещения: первая полоса – на один шаг p , вторая – на два шага $2p$, а i -я полоса – на i шагов p .

Таким образом, основное свойство муаровых полос состоит в том, что они являются геометрическим местом точек, имеющих одинаковые перемещения в направлении, перпендикулярном к линиям контрольного растра. Если положение контрольного растра совпадает с первоначальным положением растра, нанесенного на исследуемую поверхность деформируемого тела, то возникающие в процессе деформирования муаровые полосы непосредственно определяют компоненты перемещения в направлении, перпендикулярном к линиям контрольного растра.

Таким образом, муаровый эффект возникает в результате определенной комбинации геометрической интерференции падающего света и оптического рассеяния проходящего света. Это обстоятельство налагает определенные требования на ширину линий растров. С одной стороны, при достаточно широких линиях растров полосы проходящего света также весьма широки и оптическое рассеяние приводит к тому, что видимая картина воспринимается в виде равномерного серого фона.

С другой стороны, при использовании растров с очень узкими линиями оптическое рассеяние приводит к появлению дифракционных картин, искажающих или уничтожающих муар.

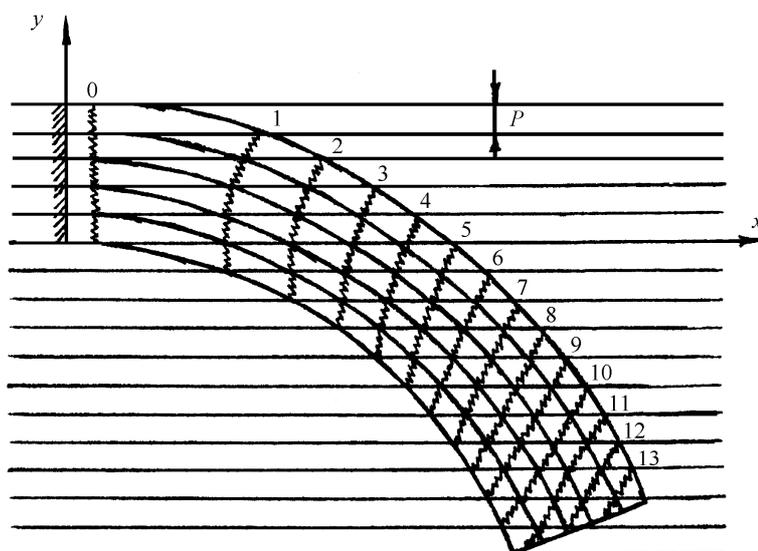


Рис. 3.4

Геометрическое место точек, имеющих одинаковые компоненты перемещения в каком-либо направлении, называется изотетикой. Муаровые полосы можно рассматривать как соответствующие изотетики, при этом разность перемещений между соседними полосами (изотетиками) постоянна и равна шагу контрольного раstra. Картину муаровых полос можно использовать для определения относительных перемещений точек деформируемого тела в направлениях, перпендикулярных к линиям контрольных растров.

3.4. Определение деформированного состояния с помощью муара

Основное свойство муаровых полос позволяет использовать муаровые картины для анализа деформированного состояния материала. В процессе формоизменения точки тела получают смещения и связанные с ними линии меняют свое положение и форму. При наложении контрольного раstra на искаженную деформацией систему этих линий возникают полосы муара, которые являются изотетиками главного направления контрольного раstra, т.е. наблюдатель фиксирует положение точек, получивших равное смещение в направлении, перпендикулярном к линиям контрольного раstra. Величина этого смещения равна порядковому номеру видимой полосы муара, умноженному на шаг контрольного раstra. Зная смещения точек u_x и u_y в двух взаимно перпендикулярных направлениях, можно определить деформации

$$e_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}; e_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}. \quad (3.1)$$

Для того чтобы получить необходимую информацию о перемещениях, достаточно на каждом этапе формоизменения продеформировать два образца, у которых направления линий растров перпендикулярны. Необходимо указать, что, как и в методе визиопластичности, использование уравнений (3.1) вносит в оценку деформи-

рованного состояния погрешность, обусловленную отсутствием учета жесткого вращения.

При исследовании с помощью муара деформаций плоских поверхностей или сечений деформируемого тела, остающихся плоскими и в процессе деформации (главные плоскости), вносят растр определенной геометрии. Чаще всего используются линейные растры, поскольку при их изготовлении легче обеспечить требуемую точность. Растры обычно наносят напылением или фотохимическим способом на металлические пластинки, закладываемые между половинками разъемного образца или непосредственно на образцы. Проведение эксперимента не отличается от опытов с делительными сетками. Особое внимание уделяется тщательному изготовлению образцов, нанесению растра и точному выполнению этапной деформации. Исходный и деформированный растры фотографируются широкоформатной камерой с одной установки, и при наложении негативов наблюдается картина муаровых полос.

Получив картины муаровых полос при деформации растров, образующие линии которых направлены вдоль осе координат ox (x - растр) и oy (y - растр), деформации легко рассчитать по формулам (3.1). При использовании обозначений, приведенных на рис. 3.5, формулы примут вид

$$e_x = \frac{P}{\Delta X_x}; e_y = \frac{P}{\Delta Y_y}; \gamma = P \left(\frac{1}{\Delta Y_x} + \frac{1}{\Delta X_y} \right). \quad (3.2)$$

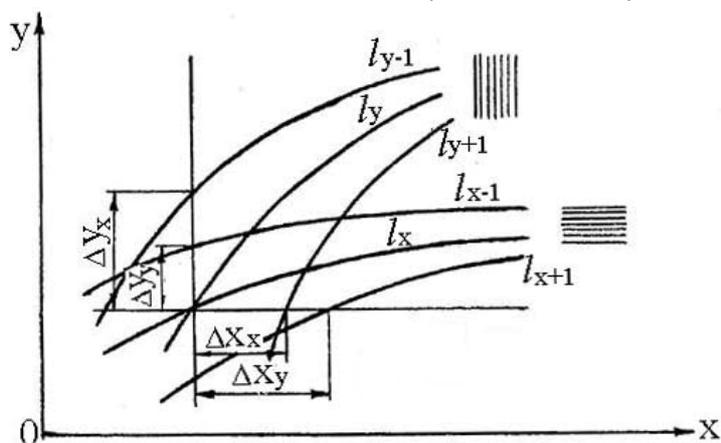


Рис. 3.5

Метод муар в настоящее время интенсивно развивается и находит широкое применение для определения деформированного состояния материала в процессах обработки металлов давлением.

Задания для самоконтроля

1. Что называется муаром в экспериментальной механике?
2. Что такое шаг растра и частота растра?
3. Перечислите основные свойства муаровых полос.

Каким образом осуществляется определение деформированного состояния с помощью муара?

План

- 4.1. Сущность метода
- 4.2. Способы измерения твердости
- 4.3. Построение тарировочных графиков
- 4.4. Определение интенсивности напряжений и деформаций

Задания для самоконтроля**4.1. Сущность метода**

Метод исследования деформированного состояния по измерению твердости деформируемого тела основан на широко известном факте существенного изменения физико-механических свойств металлов при их пластическом формоизменении. Это изменение обусловлено работой, затраченной на пластическое деформирование металла. Так, при холодной обработке металлов давлением способность металлов сопротивляться последующей пластической деформации возрастает, а способность их деформироваться снижается. В частности, это связано с упрочнением, вызванным пластической деформацией, и такая характеристика физико-механических свойств металла, как твердость, вследствие этого может служить мерой работы, затраченной на пластическое формоизменение металла. Располагая установленной для конкретного металла зависимостью между показателями напряженно-деформированного состояния (интенсивностями напряжений и деформаций) и твердостью, измеряя твердость в различных точках деформируемого тела, можно оценить напряженно-деформированное состояние в них.

Г.Д. Делем экспериментально было установлено существование для каждого металла единой зависимости между твердостью и интенсивностью напряжений для различных схем напряженного состояния и путей нагружения [2].

Поскольку между интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций существует связь, определяемая кривой течения (кривой истинных напряжений), которая также практически не зависит от схемы напряженно-деформированного состояния для большинства обрабатываемых давлением материалов (гипотеза единой кривой течения), то по определенному значению твердости можно судить и о деформированном состоянии в точке тела.

Типичная зависимость между твердостью, интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций, называемая тарировочным графиком, показана на рис. 4.1.

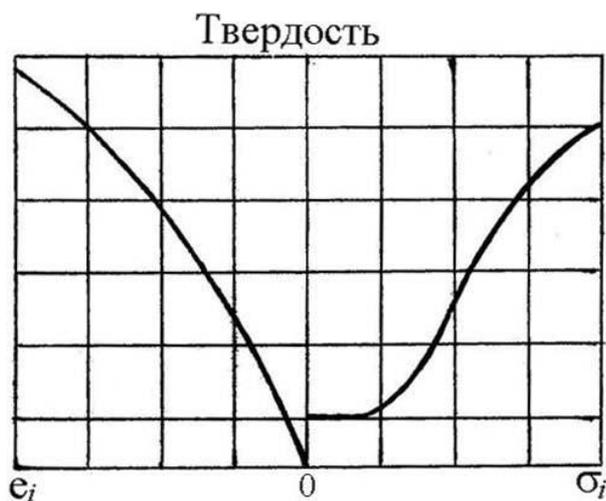


Рис. 4.1

Следует указать, что метод измерения твердости дает возможность получить объективную информацию при анализе не очень малых и не очень больших деформаций, поскольку при анализе малых деформаций большой разброс исходной твердости материала вносит существенную погрешность, а при анализе больших деформаций, при которых материал уже мало упрочняется, твердость остается практически постоянной и не может характеризовать деформированное состояние.

4.2. Способы измерения твердости

При исследовании напряженно-деформированного состояния пользуются различными способами определения твердости. Выбор способа измерения твердости зависит от размеров образца или области пластической деформации, неравномерности распределения деформаций.

Условия испытаний по определению твердости регламентированы ГОСТ 9012-84 (по Бриннелю), ГОСТ 2999-84 (по Виккерсу), ГОСТ 9013-84 (по Роквеллу) и ГОСТ 9450-76 (микротвердость).

Несмотря на то, что между микро- и макротвердостью существует вполне определенная связь, считается целесообразным использовать измерение микротвердости лишь в крайних случаях, например при малых размерах пластической области и большой неравномерности распределения деформаций. Это связано с серьезными трудностями измерения микротвердости.

Для получения стабильных результатов измерения твердости поверхность, на которой производятся замеры, должна быть хорошо отшлифована (9, 10-й класс чистоты). Наиболее надежную информацию получают, используя метод Бриннеля (для больших областей пластической деформации) и метод Виккерса (для небольших областей пластической деформации).

При испытаниях по Бриннелю рекомендуется выдерживать расстояние от центра отпечатка до края образца не менее $2,5d$ (диаметр отпечатка), а расстояние между центрами двух соседних отпечатков — не менее $4d$. У мягких металлов с $HB < 35$ эти расстояния должны быть соответственно не менее $3d$ и $6d$. Толщина образца должна быть не менее десятикратной глубины отпечатка.

При замерах твердости по Виккерсу минимальная толщина образцов из стали должна быть больше диагонали отпечатка в 1,2 раза и в 1,5 раза при испытании цветных металлов. Расстояние между центрами отпечатков и от края образца должно быть не менее 2,5 длины диагонали отпечатка.

Недостатком способа замера твердости по Роквеллу является невысокая стабильность получаемых результатов.

4.3. Построение тарировочных графиков

Для построения тарировочного графика интенсивность напряжений – твердость – интенсивность деформаций необходимо измерять твердость при различной величине деформации образца, напряженно-деформированное состояние которого известно. Обычно тарирование проводят путем испытания образца на растяжение или сжатие. В обоих случаях интенсивность напряжений определяют по выражению

$$\sigma_i = \frac{4P}{\pi D^2}, \quad (4.1)$$

где P - деформирующее усилие; D - диаметр продеформированного образца.

Интенсивность деформации определяют по выражению

$$e_i = \ln \frac{l_1}{l_0}, \quad (4.2)$$

где l_1 и l_0 - длина образца после и до деформирования при растяжении, и высота образца до и после деформирования при сжатии.

При построении тарировочного графика из опытов на сжатие изготавливается серия одинаковых образцов, испытанием одного из которых определяется твердость материала в недеформированном состоянии, а остальные осаживаются до различных степеней деформации. Осаженные образцы разрезают по меридиональному сечению и полученную поверхность шлифуют, после чего на этой поверхности проводят замеры твердости в нескольких точках. Осредненное значение твердости принимают за твердость, соответствующую данному напряженно-деформированному состоянию. Испытания на сжатие ограничиваются началом бочкообразования, при котором вследствие неравномерности деформаций твердость в меридиональном сечении имеет большой разброс.

При построении тарировочного графика из опытов на растяжение образцы растягиваются до различных степеней деформации (некоторые образцы доводят до разрушения). На деформированных образцах выполняют лыски, в различных точках которых измеряют твердость. Надежные результаты получают до момента образования шейки, после чего напряженное состояние перестает быть линейным и для его определения необходимо вводить известные поправки, например поправку Давиденкова – Спиридоновой.

Для уменьшения погрешности, связанной с возможным различием между исходной твердостью исследуемого тела и твердостью тарировочных образцов, тарировочный график рекомендуют строить в координатах интенсивность деформации – приращение твердости.

4.4. Определение интенсивности напряжений и деформаций

Для определения по тарировочному графику интенсивности напряжений и деформаций в области пластической деформации исследуемого тела необходимо

знать распределение твердости в этой области. Обычно исследуемое тело после деформирования (или этапа деформирования) разрезают. Слой материала, получившего упрочнение в результате этой операции, удаляют. Для этого после чистового строгания или точения испытываемую поверхность шлифуют для измерения макротвердости или полируют для измерения микротвердости. Рекомендуют сочетать механическое полирование с травлением и электрополированием. Технология обработки испытываемых поверхностей тарировочных образцов и исследуемого тела должна быть примерно одинаковой.

После измерения твердости в различных точках поверхности результаты наносят на эскиз этой поверхности и статистически обрабатывают. Обычно для этого наносят изосклеры – линии равной твердости. По поверхности из тарировочного графика определяют соответствующую каждой изосклере величину интенсивности напряжений и деформаций.

В некоторых случаях полученной информации достаточно для определения компонентов тензора-девиатора деформаций. Чаще же метод измерения твердости используют в комбинации с геометрическими методами исследования деформации.

Задания для самоконтроля

- 1. Сущность метода измерения твердости.*
 - 2. Перечислите способы измерения твердости.*
 - 3. Опишите методику построения тарировочного графика «интенсивность напряжений – твердость – интенсивность деформаций».*
 - 4. Расскажите о системе опытов для построения тарировочного графика «интенсивность напряжений – твердость – интенсивность деформаций».*
- Каким образом можно определить интенсивности напряжений и деформаций по тарировочному графику «интенсивность напряжений – твердость – интенсивность деформаций»?*

Лекция № 9. Деформируемость металлов в операциях обработки давлением

План

- 5.1. Пластичность металлов
- 5.2. Критерии деформируемости
- 5.3. Использование информации о деформированном состоянии для оценки возможного разрушения металлов

Задания для самоконтроля

5.1. Пластичность металлов

Под пластичностью понимают состояние материала, в котором он обладает способностью претерпевать неисчезающие после снятия нагрузки деформации (необратимые, остаточные, пластические) [1, 5-9, 13, 21, 25]. Практически для всех известных материалов можно создать необходимые условия (температуру, давление и т.д.) для перехода в такое состояние. Даже материалы, которые обычно считаются хрупкими (горные породы, например мрамор), при высоких давлениях переходят в пластическое состояние.

Находясь в пластическом состоянии, различные материалы до разрушения способны претерпеть различную по величине пластическую деформацию. Накопленную к моменту разрушения (образования первых макротрещин) интенсивность деформаций называют ресурсом пластичности. Ресурс пластичности конкретного материала не является постоянной величиной, а существенно зависит от условий деформирования (температуры, напряженного состояния, скоростей деформирования и деформаций и т.д.) и их изменения в процессе деформирования.

Наряду с понятием ресурсов пластичности вводится понятие предельной пластичности материала, под которой следует понимать ресурс пластичности материала, деформируемого при фиксированных значениях параметров, определяющих условия деформирования.

Графическую зависимость предельной пластичности материала от коэффициента жесткости напряженного состояния называют диаграммой пластичности. Диаграммы пластичности различных материалов обычно строят в координатах коэффициент жесткости напряженного состояния – предельная пластичность. В качестве коэффициента жесткости напряженного состояния часто используют величину

$$\eta = \frac{3\sigma_{cp}}{\sigma_i},$$

где σ_{cp} - среднее напряжение; σ_i - интенсивность напряжений.

Этот коэффициент фактически определяет безразмерную (отнесенную к текущему значению предела текучести) величину среднего напряжения, т.е. он исключает влияние упрочнения.

При простом растяжении

$$\sigma_{cp} = \frac{1}{3}\sigma_1; \quad \sigma_i = \sigma_1; \quad \eta = 1.$$

При чистом кручении

$$\sigma_{cp} = 0; \eta = 0.$$

При одноосном сжатии

$$\sigma_{cp} = \frac{1}{3}\sigma_3; \sigma_i = -\sigma_3; \eta = -1.$$

Диаграммы пластичности металлов (типичный вид диаграммы приведен на рис. 5.1, кривая 1) строят по экспериментальным данным.

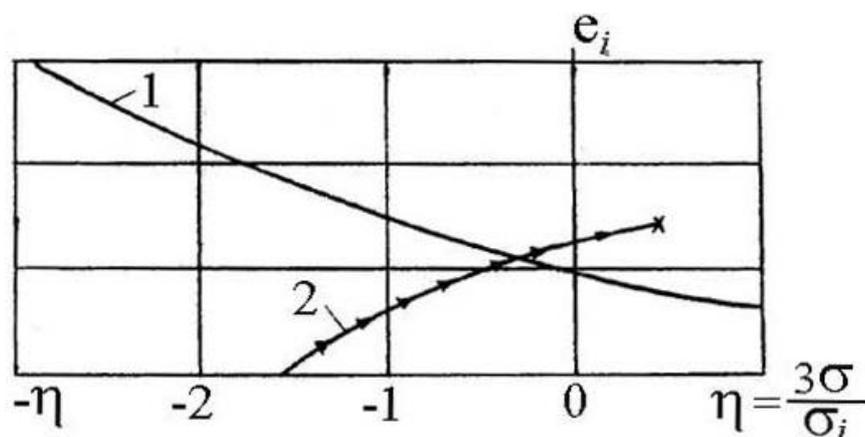


Рис. 5.1

Так, испытывая образцы конкретного материала на растяжение, сжатие, растяжение с кручением, сжатие с кручением, определяют значения предельной пластичности в области $-1 \leq \eta \leq 1$. В области $\eta < -1$ предельную пластичность определяют, испытывая образцы в специальных установках высокого давления. Диаграммы пластичности материалов строят для различных температур. Возрастание предельной пластичности материала при увеличении сжимающих напряжений объясняется происходящим при этом «залечиванием» имевшихся дефектов, а также микротрещин и пор, возникающих в металлах при относительном скольжении их частиц в процессе деформации.

5.2. Критерии деформируемости

Способность материала к деформированию без разрушения (деформируемость материала) при обработке давлением принято характеризовать ресурсом пластичности. В большинстве операций обработки металлов давлением условия деформирования на протяжении процесса изменяются — меняются напряженно-деформированное состояние выделенного объема деформируемого тела, его температура, скорость деформации и т.д.

При пластическом формоизменении выделенные объемы деформируемого тела всегда перемещаются из областей больших сжимающих напряжений в области меньших давлений, накапливая при этом различные величины интенсивности деформаций. Зависимость параметров, определяющих условия деформирования выделенного объема, от времени или заменяющего его параметра (перемещения в пластической области, этапа деформирования и т.п.) называют историей деформирования. Графическую зависимость величины накопленной деформации выделенного

объема от коэффициента жесткости напряженного состояния (рис. 5.1, кривая 2) называют траекторией деформирования.

Степень использования (расходования) ресурса пластичности выделенного объема согласно В.А. Колмогорову можно оценить коэффициентом использования ресурса пластичности [5-9]:

$$\psi = \int_0^t E(t-\tau)B(\tau) \frac{d e_i}{(e_i)_{np}[\eta(t)]} d\tau \leq 1, \quad (5.1)$$

где τ, t - время или заменяющий его параметр; $E(t-\tau)$ - коэффициент, учитывающий самозалечивание дефектов при высоких температурах и монотонно убывающий от 1 до 0 с увеличением аргумента; $B(\tau)$ - коэффициент, учитывающий историю деформирования; $d e_i$ - приращение интенсивности деформаций; $(e_i)_{np}[\eta(t)]$ - функция, описывающая диаграмму пластичности.

В настоящее время теория обработки металлов давлением не располагает необходимой информацией о значениях коэффициентов E и B для различных процессов и операций обработки давлением, и при расчетах их обычно принимают равными единице. При этом критерий (5.2) можно записать в виде

$$\psi = \int_0^{(e_i)} \frac{d e_i}{(e_i)_{np}[\eta]} \leq 1. \quad (5.3)$$

Смысл критерия (5.3) состоит в том, что сумма отношений приращений интенсивности деформаций, происходящих при определенных значениях η к предельной пластичности материала при тех же значениях η за весь процесс деформирования без разрушения не должна достигать значения, равного единице. Если в процессе деформирования $\eta = const$, то условие (5.3) принимает вид

$$e_i \leq (e_i)_{np}, \quad (5.4)$$

т.е. условие деформирования без разрушения требует, чтобы накопленная в процессе деформирования интенсивность деформаций не превышала величины предельной пластичности материала.

Очевидно, критерий деформируемости без разрушения (5.4) справедлив при $\eta \neq const$ лишь для материала, предельная пластичность которого есть величина постоянная, т.е. ресурс пластичности не зависит от условий деформирования.

Экспериментальные исследования показали, что критерий деформируемости (5.3) справедлив, когда деформация частицы протекает в условиях близких к монотонным. Условия деформирования называют близкими к монотонным, если:

а) главные компоненты скоростей деформации ξ_1, ξ_2, ξ_3 точно не совпадают с одними и теми же материальными направлениями, не поворачиваются в процессе деформации относительно их не больше чем на угол $\frac{\pi}{2}$;

б) отношение между ξ_1, ξ_2, ξ_3 не сохраняется постоянным, но главные скорости удлинения в процессе деформации изменяются монотонно без смены знака.

В случае существенно немонотонного деформирования разрушение происходит при больших деформациях, чем предсказывает условие. Существенно немонотонным называют деформирование, при котором, по крайней мере, один раз изме-

нилось направление деформации в некотором материальном направлении (удлинение сменилось укорочением или наоборот).

Вся существенно немонотонная деформация моментами смены её направления может быть разделено на этапы деформирования, в которых деформация близка к монотонной. Ресурс пластичности рекомендуется оценивать по формуле

$$\psi = \sum_{k=1}^n \int_0^{e_{ik}} \frac{a e^{a-1}}{e^{inp k}} de_{ik}, \quad (5.5)$$

где $a = f(T, \sigma, \mu_{\sigma}, H)$.

В результате экспериментальных исследований показано, что после холодной обработки давлением при $\psi_* = 0,2 \dots 0,33$ отжигом полностью восстанавливается пластичность материала, при $\psi_* = 0,5 \dots 0,6$ резко уменьшается восстановление запаса пластичности, и незалечимые микропоры переходят в незалечимые макропоры.

Оценка возможности деформирования без разрушения по критериям деформируемости позволяет правильно разрабатывать технологические процессы обработки металлов давлением и осуществлять мероприятия, способствующие получению качественных изделий и интенсификации процессов их получения. Если анализ показывает, что в некоторых опасных зонах ресурс пластичности материала в конкретном процессе деформирования исчерпан (коэффициент использования ресурса пластичности равен единице), то дальнейшее деформирование может быть осуществлено лишь в том случае, если удастся изменить условие протекания процесса. Повысить ресурс пластичности материала можно путем увеличения гидростатического давления в процессе деформирования (например, осуществляя процесс прессования с противодавлением) или нагревая материал.

Следует указать, что решающий вклад в развитие представлений о деформируемости металлов сделан отечественными исследователями Г.А. Смирновым-Аляевым, Л.Д. Соколовым, В.Л. Колмогоровым, А.А. Богатовым, Б.А. Мигачевым, О.И. Мижирицким, Г.Д. Делем, В.А. Огородниковым, Л.Г. Степанским и др. [1, 5-9, 13,21, 25].

5.3. Использование информации о деформированном состоянии для оценки возможности разрушения металлов

Для оценки возможности разрушения металла в процессе деформирования, кроме диаграммы пластичности данного металла при температуре обработки, необходимо построить траекторию деформирования объема деформируемого тела, попадающего в опасную из-за возможности разрушения область. Заранее предсказать зону возможного разрушения, а следовательно, и установить начальное положения объема, который в процессе деформирования попадает в опасную область, удастся чрезвычайно редко. Это возможно только в простейших операциях деформирования (например, при осадке разрушение начинается на боковой поверхности образца). В более сложных операциях для обнаружения опасных зон необходимо проводить специальное исследование, этапами которого являются:

1. Исследование деформированного состояния материала в изучаемой операции деформирования, которое можно провести методами, изложенными в предыдущих разделах данного пособия.

2. *Определение напряженного состояния материала в изучаемой операции деформирования. В некоторых случаях напряженное состояние в точках тела может быть определено теоретически с помощью известных решений. Чаще напряженное состояние определяют, используя уравнения равновесия и соотношения между напряжениями и приращениями деформаций (теории течения) или самими деформациями (теория конечных деформаций).*

3. *Построение траекторий деформирования выделенных объемов. При исследовании установившихся процессов формоизменения для построения траектории используют информацию о значениях интенсивностей деформаций и напряжений и о среднем напряжении в различных объемах, расположенных вдоль линий тока. При изучении неуставившихся процессов формоизменения используют информацию, полученную для одних и тех же выделенных объемов на различных этапах деформирования.*

4. *Определение значений коэффициентов использования ресурса пластичности. Полученная информация позволяет предсказать опасные с точки зрения возможности разрушения области и оценить сохранившийся запас пластичности материала.*

Располагая такими данными для различных операций обработки металлов давлением и условий их осуществления, можно обоснованно управлять технологическими процессами получения качественных изделий.

Задания для самоконтроля

1. *Что понимается под пластичностью материала?*
2. *Что понимается под ресурсом пластичности?*
3. *Назовите координаты диаграммы пластичности.*
4. *Опишите диаграммы пластичности.*
5. *Запишите выражение для определения коэффициента жесткости напряженного состояния.*
6. *Приведите выражения для оценки степени использования ресурса пластичности согласно В.А. Колмогорову?*
7. *Какое деформирование называется монотонным?*
8. *Какое деформирование называется существенно немонотонным?*
9. *Запишите выражение для определения степени использования ресурса пластичности, учитывающего самозалечивание дефектов при высоких температурах и знакопеременной деформации, и без их учета.*
10. *Расскажите о рекомендациях по величине степени использования ресурса пластичности.*

Опишите последовательность использования информации о деформированном состоянии для оценки возможности разрушения металлов.

Библиографический список рекомендуемой литературы

1. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. - М.: Металлургия, 1984. - 144 с.
2. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. 329 с.
3. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. М.: Машиностроение, 1971. 200 с.
4. Дюрелли А., Паркс В. Анализ деформаций с использованием муара. М.: Мир, 1974. 230 с.
5. Золотухин Н.М. Нагрев и охлаждение металла. М.: Машиностроение, 1973. 192 с.
6. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.
7. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2001. 836 с.
8. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение. М.: Металлургия, 1970. 232 с.
9. Колмогоров В.Л. Элементы теории физического моделирования процессов обработки металлов давлением, анализ размерностей, аналогии. Свердловск, 1975 80 с.
10. Колмогоров В.Л., Мигачев Б.А., Бурдуковский В.Г. Феноменологическая модель накопления повреждений и разрушения при различных условиях нагружения. -Екатеринбург: УрОРАМ, 1994. 104 с.
11. Макушок Е.М. и др. Новые методы исследования процессов обработки металлов давлением. Минск: Наука и техника, 1975. 157 с.
12. Макушок Е.М. и др. Теоретические основыковки и горячей объемной штамповки. Минск: Наука и техника, 1968. 286 с.
13. Метод подобия в теории прокатки / В.С. Смирнов, А.К. Григорьев, А.Д. Карачунский и др. М.: Металлургия, 1971. 180 с.
14. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Вища школа, 1983. 175 с.
15. Полухин П.И., Воронцов В.К., Кудрин А.Б., Чичинев Н.А. Деформация и напряжения при обработке металлов давлением. Применение методов Муар и координатных сеток. М.: Металлургия, 1974. 336 с.
16. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.
17. 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.
18. Ренне И.П. Экспериментальные методы исследования пластического формоизменения в процессах обработки металлов давлением с помощью делительной сетки. Тула: ТПИ, 1970. 135 с.
19. Ренне И.П., Иванова Э.А., Бойко Э.А., Филигаров Ю.М. Неравномерность деформации при плоском пластическом течении. Часть I. Стационарное плоское течение. Тула: ТПИ, 1971. 158 с.

20. Седов Л.И. Методы подобия и размерностей в механике. М.: Наука, 1981. 448 с.
21. Смарагдов И.А. Способ обработки искаженной делительной сетки при исследовании пластического формоизменения // Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Вып. IV. Тула, ТПИ, 1976. С. 130-138.
22. Смирнов-Аляев Г.А., Чикидовский В.П. Экспериментальные методы в обработке металлов давлением. Л.: Машиностроение, 1972. 360 с.
23. Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1979. 215 с.
24. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
25. Сухарев Н.П., Ушаков Б.Н. Исследование деформаций и напряжений методом муаровых полос. – М.: Машиностроение, 1969. – 215 с.
26. Теокарис П. Муаровые полосы при исследовании деформаций. – М.: Мир, 1972. – 120 с.
27. Теорияковки и штамповки: Учебное пособие для студентов машиностроительных и металлургических специальностей вузов // Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др.; Под общ. ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1992. 720 с.
28. Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш. Механика пластических деформаций при обработке металлов. М.: Машиностроение, 1969. 504 с.
29. Чижииков Ю.М. Теория подобия и моделирование процессов обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1970. 296 с.
30. Шейк Х. Теория инженерного эксперимента. М. , 1972. 384 с.
31. Шнейдерович Р.М., Левин О.А. Измерение полей пластических деформаций методом муара. М.: Машиностроение, 1970. 150 с.
32. Теория обработки металлов давлением. Учебник для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению 150400 «Технологические машины и оборудование». Регистрационный номер рецензии 341 от 25 мая 2009 г. в соответствии с приказом Минобрнауки России от 15 января 2007 г. №10 / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь // под редакцией В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. – 442 с.
33. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов М.: Машиностроение, 1998. 446 с.