

**АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

На правах рукописи

БЕЙГЕЛЬЗИМЕР Яков Ефимович

**ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
В ИССЛЕДОВАНИИ И РАЗРАБОТКЕ ПРОЦЕССОВ
ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 01.04.07 — «Физика твердого тела»

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

ДОНЕЦК — 1994

Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена в Донецком физико-техническом институте АН Украины.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор, академик АНУ	Алексеев А.Д.
доктор технических наук, профессор	Гаврилик В.Г.
доктор физико-математических наук, профессор	Токий В.В.

Ведущая организация: Институт проблем материаловедения АН Украины.

Защита состоится " 10 " февраля 1994г. в 14 ³⁰ часов на заседании Специализированного Совета Д.016.32.01 при Дон ФТИ АН Украины по адресу: 340114, Донецк, ул.Р.Луксембург, 72.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Дон ФТИ АН Украины.

Автореферат разослан " 4 " января 1994 г.

Ученый секретарь
Специализированного Совета
кандидат физико-математических наук

С.Е.Соловьев
С.Е.Соловьев

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00756631 (S)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Открытие эффекта пластификации твердых тел под давлением инициировало развитие физических, материаловедческих и технологических исследований. В настоящее время, несмотря на значительный прогресс, достигнутый по данной проблеме в рамках каждой из этих дисциплин, можно констатировать слабое взаимодействие между исследованиями, проводимыми в разных направлениях.

Обусловлено это тем, что деформируемый материал, совместно с другими объектами технологического процесса, представляет собой сложную многоуровневую систему, а каждая из указанных дисциплин связана с определенными масштабными уровнями.

Такое положение дел нельзя признать удовлетворительным, так как целый ряд важных с практической точки зрения эффектов обусловлен нелинейным взаимодействием между микро- и макроявлениями. В связи с этим, несмотря на успехи физики пластических деформаций под давлением, ее результаты не могут быть достаточно эффективно использованы при разработке технологий, так как получены они в условиях относительно простых испытаний, и нет способа распространения этих результатов на более сложное напряженно-деформированное состояние.

Из сказанного следует, что актуальными являются исследования и разработки, направленные на установление более тесного взаимодействия между физическими и технологическими исследованиями, которые бы позволили, с одной стороны, более эффективно использовать результаты физических исследований в технологиях, а с другой стороны - поставили бы перед физикой новые задачи, вытекающие из практики обработки металлов давлением.

"Благодарным" технологическим объектом в смысле такого взаимодействия являются процессы обработки материалов в среде жидкости высокого давления (гидростатическая обработка материалов), источия развития которых тесно связана с физическими исследованиями. Дело в том, что жидкость представляет собой уникальный инструмент, не имеющий собственной формы и оказывающий малое сопротивление сдвиговым деформациям. Благодаря этим качествам жидкости, можно так организовать процесс пластического деформирования, чтобы относительно легко и, главное, без потери

устойчивости заготовки, управлять величиной гидростатической составляющей тензора напряжений в очаге деформации и, следовательно, реализовать известные положительные эффекты высоких давлений.

Цель работы:

разработка континуальной теории пластического деформирования и разрушения материалов под давлением, учитывающей влияние давления на микро- и мезоскопические механизмы этих процессов, и создание на этой основе физически обоснованных методов расчета и проектирования процессов гидростатической обработки материалов.

В диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Предложить концепции взаимодействия исследований в области физики пластических деформаций под давлением с технологическими разработками.

2. Разработать математическую модель структурно-неоднородной среды, учитывающую основные эффекты влияния давления на механизмы пластической деформации и разрушения компактных, пористых и порошковых материалов.

3. На основе результатов физических исследований и разработанной физической модели структурно-неоднородной среды получить критерии макроскопического разрушения и устойчивости деформирования материалов под давлением.

4. Разработать математическую модель трения в процессах обработки материалов жидкостью высокого давления.

5. Разработать математические модели конкретных технологических операций обработки компактных и некомпактных материалов жидкостью высокого давления, отражающие основные черты поведения объектов технологии и позволяющие прогнозировать наиболее важные характеристики процесса и изделия на стадии проектирования технологии.

6. Предложить методы и устройства для проектирования процессов обработки материалов жидкостью высокого давления, органически сочетающие в себе различные виды знаний об этих процессах: результаты физических исследований и математического моделирования, а также опыт, накопленный в ходе технологических разработок.

7. Разработать основные принципы построения систем автоматизированного проектирования процессов обработки материалов жидкостью высокого давления, которые бы могли активно поддерживать проектирование (используя для этого указанные выше различные виды

знаний) при неформализованном техническом задании на продукцию, с учетом большого числа варьируемых ограничений и при нечетко заданных критериях оптимизации.

На защиту выносятся:

1. Макроскопическое условие пластичности структурно-неоднородных материалов, базирующееся на довольно общих посылах, отражающих реальную физическую природу развития пластических деформаций на мезоуровне, и учитывающее влияние гидростатического давления на механизмы пластической релаксации внутренних напряжений.

2. Система определяющих уравнений механики пластичности, учитывающая взаимосвязь процессов деформации и разрушения на мезоуровне и описывающая влияние гидростатического давления на эти процессы.

3. Континуальная модель контактного трения при обработке металлов давлением, основанная на представлении зоны фрикционного контакта в виде слоя структурно-неоднородного материала.

4. Система моделей и методов для исследования и разработки процессов гидростатической обработки материалов.

Научная новизна. Предложена макроскопическая мера эффективности действующих механизмов пластической релаксации внутренних микронапряжений.

Предложено и обосновано макроскопическое условие пластичности структурно-неоднородных материалов, базирующееся на довольно общих посылах, отражающих реальную физическую природу развития процессов пластической деформации и разрушения на мезоуровне.

Получена система определяющих уравнений механики пластичности, учитывающая взаимосвязь процессов деформации и разрушения на мезоуровне.

Получены соотношения для предельной и стационарной пористости, связывающие их с эффективностью действующих механизмов пластической релаксации микронапряжений.

Предложено описание упруго-пластического перехода в рамках теории перколяции.

Разработана континуальная модель контактного трения при обработке металлов давлением, основанная на представлении зоны фрикционного контакта в виде слоя структурно-неоднородного материала.

Разработана система математических моделей для исследования и

проектирования технологического процесса гидропрессования. Модели позволяют изучать формирование показателей качества продукции (прочностных и пластических характеристик материала, шероховатости поверхности изделия), исследовать динамическую устойчивость процесса, определить условия деформации без макроскопического разрушения заготовки, оценить энерго-силовые параметры процесса.

Разработана модель гидромеханического обжима, позволяющая исследовать изменение геометрических размеров заготовки, изучать формирование прочностных и пластических характеристик деформируемого материала, определить момент появления полос локализованной деформации в стенке заготовки, оценить энерго-силовые параметры процесса, исследовать различные режимы работы установок.

Разработана математическая модель гидромеханической осадки порошковых и пористых материалов, которая позволяет исследовать изменение пористости и геометрических размеров заготовки, определить момент потери устойчивости материала и разрушения заготовки, оценить энерго-силовые показатели процесса.

Предложен подход к автоматизированному проектированию процессов обработки материалов давлением, базирующийся на принципах экспертной системы, роль правил в которой выполняют проектные операции.

Практическая ценность. Предложенная концепция взаимодействия технологических разработок с исследованиями в области физики пластических деформаций под давлением, а также разработанная система моделей, реализующих эту концепцию, позволяют: эффективно использовать результаты физических исследований при проектировании технологий, повышая, тем самым, качество последних; поставить перед физикой пластических деформаций новые вопросы, исходящие из потребностей практики.

Качественный анализ разработанных математических моделей указывает на наиболее эффективные пути управления характеристиками технологических процессов и на резервы повышения качества выпускаемой продукции.

Расчетные соотношения, полученные на базе разработанных моделей, позволяют оценить численные значения показателей, характеризующих процесс и изделие. Предложенные устройства для определения относительного расположения входного и выходного отверстий матриц и моделирования плавных переходов от сечения

заготовки к сечению профиля, позволяют получать матрицы для гидропрессования, имеющие высокую стойкость и обеспечивающие равномерную деформацию и повышенную пластичность обрабатываемого материала.

Предложенная конструкция матриц со специально заданным распределением длины калибрующего пояса позволяет снизить давление гидропрессования и получить изделия с необходимым распределением твердости на поверхности.

Предложенный метод анализа чувствительности экспериментального решения позволяет на основании результатов экспериментов через базовую матрицу так скорректировать ее форму, чтобы улучшить те или иные характеристики процесса и изделия.

Предложенный упругий телескопический контейнер позволяет реализовать режимы гидромеханической осадки, обеспечивающие получение полуфабрикатов с заданной, однородной по объему пористостью.

Предложенный подход к автоматизированному проектированию процессов ОМД позволяет создавать САПРы, способные вести диалог с технологом, начиная с любой исходной информации при произвольных ограничениях и целях проектирования.

Реализация результатов работы в промышленности. Результаты диссертации по математическому моделированию и проектированию процессов обработки компактных и некомпактных материалов в среде жидкости высокого давления нашли свое применение при выполнении 7 хозяйственных тем. Долевой экономической эффект диссертанта составил около 250 тыс. руб. в ценах 1990 г.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

на XXX ежегодной конференции Европейской группы по высоким давлениям (Баку, 1992); на I Российско-Китайском симпозиуме "Актуальные проблемы современного материаловедения" (Томск, 1992); на XI, XII, XIII Международных конференциях AIRAPT "Исследования в науке и технике высоких давлений" (Киев, 1983; Падерборн, 1990; Бангалор, 1991); на Советско-Американской конференции "Новые материалы и технологии в трибологии" (Минск, 1992); на XIII Международной конференции "Физика прочности и пластичности металлов и сплавов" (Самара, 1992); на Международной конференции "Актуальные проблемы пластичности и обработки материалов давлением" (Варна, 1990); на VII Зимней школе по механике сплошных сред (Пермь, 1987);

на Всесоюзной конференции "Кинетика и термодинамика пластических деформаций" (Абакан, 1988); на научном семинаре "Методы механики сплошных сред в теории фазовых переходов" (Киев, 1990); на II Всесоюзном семинаре "Пластическая деформация материалов в условиях внешних энергетических воздействий" (Новокузнецк, 1991); на Всесоюзном семинаре "Структурные аспекты локализации деформации" (Рига, 1990); на VI совещании по старению металлических сплавов (Екатеринбург, 1992); на научно-технических семинарах по пластичности и деформируемости при обработке металлов давлением (Челябинск, 1986г, 1989г.); на IV и V Всесоюзных конференциях по гидростатической обработке материалов (Донецк, 1985; Минск, 1987); на VI Всесоюзной конференции по физике прочности и пластичности металлов и сплавов (Куйбышев, 1989); на XI, XII, XIV семинарах "Влияние высокого давления на вещество" (Одесса, 1986, 1987; Бердянск, 1991); на школе-семинаре "Технологическая и конструкционная пластичность порошковых материалов" (Краматорск, 1986); на семинаре "Прогрессивные технологические процессы в машиностроении" (Луцк, 1989, 1992); на научно-техническом совещании "Состояние работ в области создания проницаемых материалов и перспективы их использования" (Минск, 1989); на III Всесоюзной конференции "Контактная гидродинамика" (Куйбышев, 1981).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из: введения, семи глав, выводов, списка литературы из 320 наименований, изложена на 361 странице машинописного текста, включая 67 рисунков и 3 таблицы.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 75 печатных работ, получено 6 авторских свидетельств и положительных решений по заявкам на изобретения.

Содержание работы

Во введении показана актуальность проблемы; перечислены положения диссертации, обладающие научной новизной и практической ценностью; сформулированы основные научные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе представлен анализ исследований по физике, механике и технологиям пластических деформаций под давлением.

Цель анализа - сформулировать концепцию взаимодействия исследований в области физики пластических деформаций под давлением

с технологическими разработками, определить средства, с помощью которых эта концепция может быть реализована, осуществлять постановку, задач на их разработку и представить исходные данные для создания этих средств.

В первом параграфе главы кратко освещается история развития технологий обработки материалов жидкостью высокого давления. Значительный вклад в эту область исследований внесли: Береснев Б.И., Богоявленский К.Н., Бурак В.П., Вялов В.В., Галкин А.А., Гетманский А.П., Езерский К.И., Исаченков Е.И., Каменецкий Б.И., Кантин В.Г., Кобышев В.Г., Ковико В.С., Колмогоров В.Л., Колмогоров Г.Л., Колшанников А.И., Коставы А.А., Максимов Л.Д., Метросов Н.И., Петров А.П., Плехотин В.С., Рознов Б.В., Спусканик В.З., Уральский В.И., Федоров А.А., Черный П.Ф., Авицур Б., Джеймс П.Дж., Пью Х.Л., Фиорентино Р.Дж. и др.

Отмечается, что, несмотря на большое число лабораторных и опытно-конструкторских разработок, технологии обработки материалов жидкостью высокого давления пока не заняли достойного места в структуре промышленного производства. Однако в настоящее время ситуация складывается таким образом, что, по-видимому, следует ожидать резкого повышения интереса к указанным технологиям. Это обусловлено изменением структуры производства (в связи с переходом к рынку значительно увеличивается доля мелкосерийного производства изделий с широким спектром форм и материалов), повышением требований по ресурсосбережению и экологической чистоте.

Специалистов по разработке процессов обработки материалов жидкостью высокого давления сейчас крайне мало. Поэтому актуальной становится задача аккумулярования знаний по указанным процессам с целью тиражирования этих знаний и более эффективного их использования при проектировании технологий.

Под аккумулярованием знаний мы понимаем представление их в виде математических моделей, учитывающих основные физические закономерности пластической деформации и разрушения под давлением, а также в виде некоторых фактов и правил, опирающихся на накопленный к настоящему времени опыт проектирования технологий.

Во втором параграфе главы анализируются результаты исследований по изучению влияния давления на дефекты структуры и свойства материалов. Особое внимание уделяется эффектам, обусловленным взаимодействием различных масштабных уровней сложной иерархической системы, которую представляет собой деформируемый

материал.

Различные аспекты физики больших пластических деформаций и разрушения материалов рассматривались в работах: Бетехтина В.И., Валиева Р.З., Владимирова В.И., Гавриллук В.Г., Гриднева В.Н., Засимчук Е.Э., Зисмана А.А., Ковлова Э.В., Коневой Н.А., Лихачев В.А., Мешкова Ю.Н., Мильмана В.А., Панина В.Е., Рыбина В.В., Степанова А.В., Талуца Г.Г., Трефилова В.И., Фирстова С.А. и др.

Влияние давления на механизмы деформации и разрушения изучалось: Галкиным А.А., Алексеевым А.Д., Зайцевым В.И., Токием В.В., Фельдманом Э.П., Леонтьевой А.В., Стрельцовым В.А., Варухиным В.Н., Акимовым Г.Г. и др.

Материаловедческим аспектам воздействия давления на деформируемые материалы посвящены работы Береснева В.И., Константиновой Т.Е., Спусканика В.З., Эфрос В.М. и др.

Анализ результатов исследований по физике и материаловедению пластических деформаций и разрушения под давлением позволил установить главные черты этих явлений, которые, в последующем, были положены в основу модели деформируемого структурно - неоднородного материала. Наиболее существенные выводы из указанных исследований состоят в следующем.

С ростом величины гидростатического давления происходит изменение характера разрушения материала в направлении преобладания вязкого типа разрушения (здесь и далее фазовые и полиморфные превращения в процессе деформации не рассматриваются).

Вязкое разрушение представляет собой кинетический процесс, сопровождающий пластическую деформацию на всех стадиях и масштабных уровнях. Начинается он с возникновения и роста перенапряжений на микроуровне, связанных с необходимостью упругой accommodations при совместной деформации различных участков структурно-неоднородных и анизотропных кристаллитов.

В случае невозможности релаксации этих перенапряжений путем осуществления accommodирующих деформаций, процесс вязкого разрушения продолжается в виде "варьсообразного" появления зародышевых пор, с формой, близкой к сфере, и размером около 0,1 мкм. В результате происходит релаксация перенапряжений, после чего зародышевые поры не растут.

При дальнейшем развитии пластической деформации идут два конкурирующих процесса: рождение зародышевых пор и их заживление. При малой величине гидростатического давления более интенсивным

оказывается переносом процесс, и концентрация зародышевых пор растет в ходе деформации.

Увеличение давления, с одной стороны, интенсифицирует заветивание зародышевых пор, а с другой - тормозит их образование. Первый эффект очевиден, второй - связан с тем, что под давлением в деформируемом материале открываются дополнительные каналы релаксации перенапряжений: интенсифицируется поперечное скольжение дислокаций, активизируется множественное скольжение и т.д.

Важным обстоятельством при этом является то, что имеется целый ряд характерных для данного материала критических давлений, таких, что новые каналы релаксации напряжений (или, что то же, новые возможности пластической адаптации) открываются после того, как величина давления превисит очередное критическое значение из этого ряда. При давлениях, превышающих максимальное критическое значение, зародышевые микропоры вообще не образуются.

Рост концентрации зародышевых пор приводит к тому, что они сливаются, образуя связанные совокупности (кластеры), размеры которых увеличиваются в ходе деформации. Такая картина наблюдается вплоть до появления кластеров с размером порядка размера блоков, границы которых оказывают тормозящее действие на последующий рост кластеров. В дальнейшем растет концентрация кластеров блочных размеров. При достаточно высокой величине концентрации они начинают сливаться, образуя кластеры более высокого масштабного уровня, которые, в свою очередь, растут при деформации, поглощая несплошности блочных размеров.

Таким образом процесс разрушения переходит с нижних масштабных уровней на верхние, каждый раз подготавливая свой переход путем накопления определенной концентрации несплошностей нижнего уровня.

Последняя стадия разрушения заключается в резкой локализации пластической деформации в какой-либо области образца. Это явление вызывает потерей устойчивости "материального" типа.

В результате локализации возникает несплошность макроскопических размеров или происходит разделение образца на части, что и вызывает макроскопическим разрушением.

Экспериментальные исследования показывают, что переход к последней стадии разрушения осуществляется при некотором определенном рачплотнении материала (раэуплотнение - общий объем пор в единице объема материала), так называемом критическом раэуплотнении w_c . Величина w_c имеет порядок 10^{-2} и слабо зависит от

вида испытания. С учетом того, что последняя (локализованная) стадия разрушения требует малого приращения общей (макроскопической) деформации образца, сказанное выше позволяет ввести концентрационный критерий разрушения. Последний состоит в том, что макроразрушение происходит при достижении величиной относительного разуплотнения ω некоторого критического значения ω_c .

Гидростатическое давление, замедляя рост величины разуплотнения, увеличивает деформацию до макроразрушения и повышает устойчивость "материального" типа.

Компактные, пористые и порошковые материалы проявляют под давлением некоторое общие черты поведения, связанные с зависимостью пористости от деформации и влиянием величины давления на эту зависимость.

Эти выводы, а также результаты исследований по изучению эксплуатационных свойств изделий, полученных обработкой давлением, позволяют заключить, что важнейшим структурным параметром материала, характеризующим его поведение на макроуровне, является величина относительной пористости. По определению, это — полный объем фазы "пустоты" в единице объема тела. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что основной вклад в пористость вносят несплошности мезоскопического размера и выше (вклад вакансий, дислокаций, упругих деформаций решетки и т.д. мал). Поэтому пористость компактных материалов практически совпадает с разуплотнением.

Третий параграф первой главы посвящен некоторым общим вопросам математического моделирования процессов обработки металлов давлением.

Указывается, что в последнее время резко повысился интерес к физически содержательным моделям деформируемых материалов. В этом плане следует отметить работы Баренблатта Г.И., Вакуленко А.А., Гохфельда Д.А., Кадшенича В.И., Левитаса В.И., Макушка Е.М., Наймарка О.Б., Новожилова В.В., Садакова О.С., Сегала В.М., Седова Л.И., Скорохода В.В., Штерна М.Б., Асаро Р., Гарсона А.Л., Нидлмана А., Райса Дж., Твергада В., Хилла Р. и др.

Проведенный анализ показывает, что, несмотря на наличие общих подходов к построению определяющих соотношений для различных сред, пока нет физически содержательной модели материала, которая: описывала бы основные особенности влияния давления на механизмы пластической деформации и разрушения, допускала бы идентификацию в

простых экспериментах и могла бы служить основой для математических моделей технологических операций обработки материалов жидкостью высокого давления.

В четвертом параграфе первой главы затронуты проблемы проектирования процессов обработки материалов давлением. Отмечается, что роль физически содержательных моделей в процессе проектирования состоит не столько в том, чтобы на их основе оценить численные значения тех или иных характеристик, а в том, чтобы с их помощью лучше представить взаимосвязи между различными параметрами процесса. Это "подпитывает" интуицию технолога знаниями, полученными в ходе физических исследований, что важно на этапе создания новых технологических схем и при поиске эффективных режимов обработки материалов.

Проведенный в первой главе анализ позволил предложить концепцию взаимодействия исследований в области физики пластических деформаций под давлением с технологическими разработками, основным звеном которой является континуальная модель структурно-неоднородного материала.

Во второй главе диссертации последовательно разрабатывается физически содержательная модель структурно-неоднородного материала с дефектами типа микропор. На ее основе исследуются некоторые общие вопросы пластической деформации и разрушения.

Развитие упруго-пластической деформации в структурно-неоднородном материале рассматривается как процесс, в ходе которого по мере увеличения нагрузки растет удельный объем областей материала, перешедших в пластическое состояние. Момент наступления пластического течения связывается с разрывом кластера упругих областей, пронизывающего весь представительный объем материала (бесконечного упругого кластера). Такое понимание упруго-пластического перехода позволяет привлечь к его математическому описанию аппарат теории протекания и определить зависимость "напряжение - деформация" вплоть до момента наступления пластического течения. При этом, в качестве частного случая, получаются следующие простые выражения для модуля Юнга E и предела текучести σ_T пористого тела:

$$E = E_0 \left[1 - \frac{\theta}{0,83} \right]^{1,7}, \quad (1)$$

$$\sigma_T = \sigma_{T0} \left(1 - \theta \right) \sqrt{1 - \frac{\theta}{0,83}}, \quad (2)$$

где E_c и $\sigma_{то}$ — соответственно модуль Юнга и предел текучести каркаса пористого тела, θ — величина пористости.

Выражения (1) и (2) вполне удовлетворительно согласуются с экспериментом.

Несколько иной подход к определению механических характеристик пористых тел на основе теории протекания развивается в работах В.В. Скорохода и др. Последовательное применение этой теории с целью расчета физико-механических характеристик композиционных материалов можно найти в работах В.В. Новикова.

Математическое моделирование больших пластических деформаций осуществляется на базе следующей модели, основанной на результатах физических исследований:

представительный объем материала состоит из большого числа связанных между собой структурных элементов, которые при деформации могут смещаться и вращаться друг относительно друга, дробиться и пластически деформироваться, подстраиваясь и адаптируясь друг к другу;

при совместной деформации структурных элементов в общем случае возможна лишь частичная их адаптация с образованием из-за этого зазоров между ними;

способность к адаптации определяется эффективностью действующих механизмов деформации;

ограничения на согласованную деформацию структурных элементов количественно характеризуются величиной параметра α (коэффициента внутреннего трения); если имеется возможность полной адаптации, то $\alpha = 0$; в противном случае $\alpha > 0$, и величина этого параметра растет с ростом числа ограничений на деформацию структурных элементов;

имеется ряд критических давлений, таких, что в интервалах между ними α от давления не зависит, а при переходе через них скачком убывает при возрастании давления; под давлением, превышающим максимальное критическое значение, $\alpha = 0$.

Математическая модель материала разрабатывалась на основе континуальных представлений о деформации порошковых материалов и пористых сред. Значительный вклад в развитие этого подхода внесли Бальшин М.Ю., Гун Г.Я., Друянов В.А., Жданович Г.М., Ковальченко М.С., Лептен А.М., Лещинский В.М., Мартынова И.Ф., Мидуков В.З., Перельман В.Е., Петросян Г.Л., Роман О.В., Рудь В.Д., Скороход В.В., Степаненко А.В., Тучинский Л.И., Штерн М.Б., Грин Р., Кун Ж.,

Табата Т., Ояне М., Шима С., и др.

Определяющие соотношения, связывающие тензоры деформации и напряжения в предложенном модельном материале, получены на основе концепции течения, т.е. в предположения наличия функции нагружения и справедливости условия градиентальности.

Функция нагружения описанного выше материала имеет вид:

$$f = \frac{\sigma^2}{\Phi(\theta)} + \frac{\tau^2}{\Phi(\theta)} - (1 - \theta)(k_0 - \alpha\sigma)^2, \quad (3)$$

где $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{1k} \delta_{1k}$ - гидростатическая составляющая тензора напряжений;

$\tau = \sqrt{[\sigma_{1k} - \frac{1}{3} \sigma \delta_{1k}] [\sigma_{1k} - \frac{1}{3} \sigma \delta_{1k}]}$ - интенсивность дивизора напряжений; k_0 - коэффициент сдвигового сцепления; α - коэффициент внутреннего трения; $\varphi(\theta)$ и $\Phi(\theta)$ - функции пористости θ .

Согласно М.Б.Штерцу и И.Ф. Мартиновой

$$\varphi(\theta) = \frac{2}{3} \frac{(1 - \theta)^3}{\theta}, \quad \Phi(\theta) = (1 - \theta)^2. \quad (4)$$

Согласно М.Ояне, С. Шима, А.М. Лаптеву

$$\varphi = \frac{(1 - \theta)^{2n-1}}{6a\theta^m}, \quad \Phi = (1 - \theta)^{2n-1}, \quad (5)$$

где n , m , a - параметры, характеризующие структуру порового пространства и определяемые экспериментально.

Условие пластичности, являющееся необходимым условием пластического течения, имеет вид $f=0$, т.е.

$$\frac{\sigma^2}{\Phi(\theta)} + \frac{\tau^2}{\Phi(\theta)} = (1 - \theta)(k_0 - \alpha\sigma)^2. \quad (6)$$

При сделанных предположениях относительно зависимости α от σ (они вытекают из указанного выше влияния давления на механизмы деформации материала), уравнению (6) на плоскости " $\sigma - \tau$ " соответствует замкнутая кривая, которая, в зависимости от значений параметров модели и величины пористости, может изменяться от эллипса, смещенного в отрицательном направлении оси гидростатических напряжений, до кривой типа осевого сечения груши,

замкнутой в области больших отрицательных значений σ участком эллипса.

Впервые экспериментально подобные следы поверхности пластичности были обнаружены В.З. Мидуковым, который предположил, что физической причиной асимметрии этого следа относительно линии $\sigma=0$ являются имеющиеся в материале внутренние напряжения.

В рамках предложенной модели физической причиной указанной асимметрии является невозможность полной адаптации структурных элементов материала друг другу при их совместной деформации. Действительно, при $\alpha=0$ уравнение (6) описывает в плоскости σ - τ эллипс, симметричный относительно начала координат.

Согласно условию градиентальности, функции нагружения (3) соответствует группа следующих уравнений:

$$\frac{\dot{\sigma}\tau}{\dot{\gamma}(\theta)} = \dot{\gamma} \left[\frac{\sigma}{\phi(\theta)} + \alpha(I - \theta)(K_0 - \alpha\tau) \right], \quad (7)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{\epsilon} \cdot \delta_{ij} = -\frac{\dot{\gamma}}{4} (\sigma_{ij} - \alpha\delta_{ij}), \quad (8)$$

где $\dot{\epsilon}_{ij}$ - тензор скорости деформаций,

$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{ij} \cdot \delta_{ij}$ - его первый инвариант,

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\left[\dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{\epsilon} \cdot \delta_{ij} \right] \left[\dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{\epsilon} \cdot \delta_{ij} \right]} - \text{интенсивность}$$

дивергатора скоростей деформаций.

Уравнения (6) - (8) представляют собой математическую модель материала и являются основой для теоретического исследования технологических операций.

Соотношения (6), (7) позволяют получить ряд выводов качественного характера.

В частности, из (6) следует, что если $\alpha = \text{const} \neq 0$ и $\tau = 0$, то при $\theta = \theta^{**}$, где θ^{**} - корень уравнения

$$\frac{1}{\phi(\theta^{**})} = \alpha \sqrt{1 - \theta^{**}},$$

величина гидростатического давления $p = -\sigma \rightarrow \infty$. Это означает, что при гидростатической обработке ($\tau=0$), в случае, если работает один механизм деформации ($\alpha = \text{const}$ во время процесса обработки), материал может уплотниться лишь до некоторой предельной пористости $\theta^{**} > 0$, определяемой эффективностью ведущего механизма деформации. Дальнейшее доуплотнение возможно лишь при включении нового механизма деформации с меньшим значением α . Экспериментальные исследования подтверждают этот вывод.

Из соотношений (6), (7) легко получить следующее кинетическое уравнение для пористости θ :

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \varphi(1-\theta) \left[\frac{\eta}{\Phi} + \alpha \sqrt{1-\theta} \sqrt{\frac{1}{\Phi} + \frac{\eta^2}{\Phi}} \right], \quad (9)$$

где $\eta = \frac{\sigma}{\tau}$ — показатель жесткости напряженного состояния.

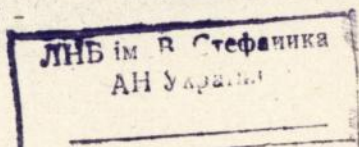
В правой части последнего уравнения содержатся два слагаемых, которые имеют разный физический смысл. Первый член в скобках уравнения (9) характерен для моделей пористых тел с бесструктурным каркасом (при $\alpha=0$). Он описывает изотропный рост и уменьшение имеющихся в материале пор, соответственно при растягивающих ($\sigma > 0$) и сжимающих ($\sigma < 0$) нагрузках.

Второй член в скобках (9) всегда больше нуля и описывает зарождение несплошностей, вызванное ограничениями на совместную пластическую деформацию различных структурных элементов.

Уравнение (9) показывает, что гидростатическое давление приводит к интенсификации залечивания микронесплошностей и подавлению процесса их зарождения. Действительно, под давлением открываются новые каналы релаксации перенапряжений (вступает в действие новые механизмы деформации), и величина α убывает. При давлениях, превышающих максимальное критическое значение, $\alpha=0$ и новые несплошности не зарождаются.

Из уравнения (9), при $\eta = \text{const} < 0$, следует, что, при пропорциональном нагружении материала под давлением, его пористость асимптотически стремится к стационарному (равновесному) значению θ_p , являющемуся корнем уравнения

$$\frac{\eta}{\Phi(\theta_p)} + \alpha \sqrt{1-\theta_p} \sqrt{\frac{1}{\Phi(\theta_p)} + \frac{\eta^2}{\Phi(\theta_p)}} = 0. \quad (10)$$



Физическая причина этого состоит в установлении равновесия между зарождением и заживлением микронесплошностей.

Помимо качественного анализа, в главе проведено количественное исследование адекватности модели структурно-неоднородного материала. С этой целью разработана методика определения параметров модели по экспериментам на гидростатическое обжатие и одноосное сжатие порошковых и пористых заготовок в закрытой матрице. Кроме того разработана методика количественного сопоставления модели с результатами экспериментов, изложенными в литературе.

В целом, проведенный анализ позволяет сделать вывод о вполне приемлемом качественном и количественном согласии теории с экспериментом для большого числа материалов (спеченная медь; порошки меди и железа; твердосплавные порошки ВК6, ВК10, ВК15С, ВК20; спеченная быстрорежущая сталь 10Р6М5; порошки керамики различного химического состава) в широком диапазоне изменения условий деформирования (от гидростатического обжатия до одноосного сжатия без бокового подпора), при гидростатическом давлении от 100 МПа до 1500 МПа и пористости от 50% до 10%.

Значения коэффициентов внутреннего трения α и сдвигового сцепления k_0 для некоторых из исследованных порошков, в диапазоне изменения гидростатического давления $100 \text{ МПа} \leq P \leq 1500 \text{ МПа}$, приведены в табл.1.

Табл.1 Значения коэффициентов внутреннего трения α , сдвигового сцепления k_0 для твердосплавных порошков и спеченного порошка быстрорежущей стали

N^n/n	Материал	α	$k_0, \text{МПа}$
1	ВК6	1,20	375
2	ВК10	1,04	450
3	ВК15С	0,96	705
4	ВК20	0,87	450
5	10Р6М5	0,45	138

В заключительной части второй главы изучается влияние давления на вязкое разрушение и локализацию деформации в структурно-неоднородном материале.

Математическому моделированию разрушения металлов при обработке давлением посвящены работы Илькина А.А., Колмогорова В.Л., Богатова А.А., Смирнова С.В., Мижаирцкого О.И., Деля Г.Д., Огородникова В.А., Сивака И.О., Михайловича В.М., Рвачева М.А., Макушка Е.М., Красновского С.М., Сегала В.М., Коставы А.А., Скуднова В.А., Герсона А.Л., Нидлмана А., Райса Дж., Твергада В. и др.

В диссертации предлагается следующая физическая модель множественного разрушения, основанная на результатах экспериментальных исследований:

на каждом масштабном уровне имеется соответствующий ему элементарный дефект - атом разрушения;

связная совокупность (кластер) атомов разрушения образует дефект этого масштабного уровня;

бесконечный кластер атомов разрушения одного уровня представляет собой элементарный дефект следующего масштабного уровня.

Под дефектами в данной модели понимаются несплошности. В соответствии с экспериментами В.И.Бетехтина и др. выделены три основных масштабных уровня разрушения. Элементарным дефектом нижнего уровня является зародышевая пора с формой, близкой к сфере, и поперечным размером 0,1 мкм. В качестве элементарных дефектов второго и третьего уровней соответственно приняты микронесплошности размера структурной гетерогенности (блока, зерна) и микронесплошность с размером порядка линейного размера предельного объема материала.

В рамках предложенной модели имеется автомодельность в развитии каскада дефектов на каждом масштабном уровне, которая вытекает из гипотезы подобия теории протекания. Нарушение автомодельности связано с появлением бесконечного кластера, представляющего собой уже элементарный дефект следующего уровня. Интересно то, что автомодельный характер множественного разрушения установлен Г.И.Варенблаттом и Л.Р.Ботвиной путем обработки большого числа экспериментов по разрушению различных материалов. Ими же обнаружена в экспериментах и потеря автомодельности при возникновении дефекта более высокого масштабного уровня.

Согласно теории протекания бесконечный кластер образуется при определенном удельном объеме кластерообразующего вещества (в нашем случае - пустоты). Отсюда следует, что элементарный дефект

микроуровня возникает при определенной величине деформационной пористости. Это проясняет смысл концентрационного критерия разрушения, установленного в экспериментах В.И.Ветехтина и др.

Оценка критической пористости с помощью аппарата теории протекания дает величину $\sim 1\%$, которая соответствует эксперименту.

В силу автомодалности, геометрия каскада дефектов полностью определяется их удельным объемом, т.е. деформационной микропористостью. Кинетическое уравнение для этой величины имеет вид:

$$\frac{d\theta}{d\gamma} = \alpha + 6\alpha\theta\gamma \quad (11)$$

Оно получено из (9) в предположении $\theta \ll 1$ и $m=1$ (указанное значение m принято на основании экспериментальных исследований). Первый член в правой части уравнения (11) отражает процессы зарождения микронесплошностей, а второй — залечивание их под давлением (при $\sigma < 0$).

Теоретическое исследование процесса формирования пластических характеристик компактных материалов при их обработке давлением, а также определение возможности макроскопического разрушения заготовки (по концентрационному критерию) осуществляется путем интегрирования уравнения (11) вдоль траектории движения частицы материала.

В настоящее время при теоретическом исследовании разрушения металлов широко используется введенная В.Л.Колмогоровым величина предельной пластичности Λ_p , которая представляет собой интенсивность деформации сдвига Λ ($\Lambda = \sqrt{2}\gamma$) до разрушения при постоянном вращении показателя жесткости напряженного состояния σ/T ($T = \frac{\tau}{\sqrt{2}}$ — интенсивность касательных напряжений).

Интегрирование уравнения (11) позволяет получить следующее выражение для Λ_p :

$$\Lambda_p = \frac{1}{3\alpha(\sigma/T)} \ln \left[1 + 3\alpha(\sigma/T)\Lambda_{pk} \right], \quad (12)$$

где $\Lambda_{pk} = \sqrt{2} \frac{\theta_0}{\alpha}$ — пластичность при кручении, θ_0 — критическая деформационная пористость.

Из (12) следует важный вывод качественного характера, согласующийся с экспериментом: при $\frac{\sigma}{T} \rightarrow -\frac{\alpha}{3\sqrt{2}a\theta_0}$ величина

$\Lambda_p \rightarrow \infty$, т.е. при достаточно больших значениях гидростатического давления возможно состояние материала с неограниченной деформируемостью. Физическая причина этого состоит в том, что в этом случае равновесное значение пористости, определяемое уравнением (10), становится меньше θ_0 .

Соотношение (12) позволяет определить величину α и a по известным значениям пластичности в испытаниях на кручение ($\sigma/T = 0$) и одноосное сжатие ($\sigma/T = -0,58$). В табл.2 приведены полученные таким образом значения параметров модели для ряда материалов.

Табл.2. Значения параметров модели, определенные по пластичности материала при кручении и сжатии

№/п	Материал	Λ_{pk}	Λ_{pc}	$a \cdot 10^2$	$\alpha \cdot 10^3$
1.	$\alpha - Fe$	5.3	6.1	2.7	2.7
2.	Ст3	4.6	5.5	3.9	2.6
3.	Ст45	3.5	4.4	6.3	4.0
4.	40X	3.4	4.5	7.6	4.2
5.	ШХ15	1.6	2.0	13.4	8.9
6.	ЗОХГСА	1.8	2.3	12.9	7.9
7.	X18H10T	1.9	2.1	5.6	7.5
8.	АД - 1	4.0	8.0	11.5	3.5

Оказалось, что в диапазоне $-1 \leq \sigma/T \leq 1$ отличие теоретических значений Λ_p от экспериментальных (для материалов, указанных в табл.2) не превосходит 10%. Это свидетельствует в пользу адекватности модели множественного разрушения.

Обращает на себя внимание резкое отличие в значениях коэффициентов внутреннего трения для порошковых систем (табл.1) и компактных материалов (табл.2). В работе дается объяснение этому факту, которое сводится к различию в напряженно-деформированном состоянии отдельных структурных элементов, в совокупности составляющих материал, и связанной с этим отличием разной способностей структурных элементов к совместной пластической деформации.

Вопросы локализации деформации рассматривались в работах Зихерова А.Т., Преснякова А.А., Ренне И.И., Штерна М.Б., Райса Дж., Рудянского Дж., Твергада В. и др. В диссертации это явление изучалось на основе предложенной модели структурно-неоднородного материала. Локализация представлялась как следствие потери устойчивости однородной деформации материала из-за его разупрочнения, связанного с образованием микронаслоистостей.

В результате проведенного исследования получен критерий потери устойчивости и показано, что гидростатическое давление повышает устойчивость материала, т.е. приводит к делокализации деформации. Этот вывод соответствует результатам физических исследований.

В третьей главе диссертации разрабатываются математические модели полужидкостного и жидкостного режимов трения в процессах обработки металлов давлением.

Теоретическому исследованию контактного трения при ОМД посвящены работы Исаченкова Е.И., Казаченка В.И., Колмогорова В.Л., Колмогорова Г.Л., Леванова А.Н., Мекушка Е.М., Покраса И.Б., Сегала В.М. и др. Модельные представления о трении, как правило, базируются на решении двух задач: совместного сжатия и сдвига пластического клина; пропахивания поверхности жестко-пластического основания при скольжении жесткого клина. В результате удается связать напряжение трения с контактным давлением на инструмент.

В диссертации предлагается континуальная модель полужидкостного трения, основанная на представлении зоны фрикционного контакта в виде слоя некоторого "третьего тела" (по терминологии И.В.Кругельского), разделяющего инструмент и заготовку. Металлографические исследования поверхностных и приповерхностных слоев при трении показывают, что "третье тело" представляет собой структурно-неоднородную среду, сдвиг которой осуществляется посредством деформации, относительного смещения, разворота и дробления огромного числа образующих среду элементов.

Отсюда возникает идея описать "третье тело" с помощью разработанной во второй главе модели структурно-неоднородного пористого материала, в порах которого находится жидкость. В этом случае определение величины контактного трения сводится к расчету интенсивности касательных напряжений в "третьем теле".

Эта идея реализована в третьей главе диссертации. В результате чего получено дифференциальное уравнение, связывающее напряжение трения с контактным давлением и величиной относительного смещения

элементов трущихся поверхностей. Это позволяет при теоретическом исследовании процессов ОМД не задавать напряжение трения в виде граничного условия, а определять его в ходе решения задачи о совместной деформации заготовки и "третьего тела".

В качестве конкретного примера в диссертации решена задача об осадке полосы без уширения. Показано формирование зон прилипания, торможения и скольжения на начальном этапе осадки.

Жидкостный режим трения при ОМД изучался в работах Исаченкова Е.И., Козаченка В.И., Колмогорова В.А., Колмогорова Г.Л., Даусона, Снайдля, Махдавиана, Уилсона и др.

В диссертации указанный режим исследуется в рамках постановок контактной гидродинамики, т.е. с учетом упругих деформаций трущихся поверхностей. При этом автором предложен и использован эффективный численный метод решения таких задач.

Последующие три главы диссертации (гл.4-гл.6) посвящены прикладным вопросам обработки материалов жидкостью высокого давления и демонстрируют конкретные примеры расчета и проектирования этих процессов в рамках предложенной концепции взаимодействия физических и технологических исследований, т.е. на основе всего имеющегося арсенала знаний - от результатов физических исследований до опыта технологических разработок.

В четвертой главе исследуется процесс гидропрессования. В первом параграфе главы разрабатывается система математических моделей, всесторонне описывающих этот процесс и позволяющих: определить энерго-силовые параметры в различных схемах гидропрессования; найти напряженно-деформированное состояние заготовки и исследовать эволюцию ансамбля микронесплошностей; получить критерий деформации без разрушения заготовки; исследовать динамику процесса и получить критерий устойчивости движения экструдата с постоянной скоростью; оценить значения показателей качества изделий (прочностных и пластических характеристик, коэффициента неравномерности деформации, шероховатости поверхности).

Теоретическому исследованию гидропрессования посвящены работы Авицура Б., Губинского А.В., Гуляева Ю.Г., Колмогорова В.Л., Колмогорова Г.Л., Кузина В.Г., Литвинова В.Г., Пью Х.Л., Чукмасова С.А. и др. Система моделей, разработанная в диссертации, отличается, во-первых, широтой охвата описываемых характеристик, а, во-вторых, тем, что основывается на физически содержательных

моделях структурно-неоднородного материала и контактного трения, разработанных во второй и третьей главах.

В рамках предложенной концепции взаимодействия физических исследований с технологическими разработками большое значение приобретают методы построения хороших начальных приближений для напряженно-деформированного состояния заготовки. В главе разработан такой метод, в котором, в качестве нулевого приближения для линий тока металла в очаге деформации, используется решение задачи о течении ньютоновской жидкости; и на этой основе с помощью метода визиопластичности строится нулевое приближение для НДС (на этот метод получено положительное решение по заявке на изобретение).

Сопоставление результатов теоретических исследований с экспериментами показывает, что разработанные математические модели качественно верно описывают процесс гидропрессования и после соответствующей калибровки позволяют, с достаточной для практики точностью, количественно оценить характеристики процесса и изделия.

Во втором параграфе четвертой главы на базе разработанных математических моделей и технологического опыта обсуждаются возможности различных приемов и средств по управлению гидропрессованием.

Основное внимание уделяется форме канала матрицы, как одному из наиболее сильных рычагов управления процессом.

Предлагаются методы и устройства для проектирования матричных каналов (они защищены авторскими свидетельствами).

В главе изложен разработанный автором метод анализа чувствительности экспериментального решения, позволяющий на основе результатов экспериментов по гидропрессованию через базовую матрицу так скорректировать ее форму, чтобы улучшить те или иные характеристики процесса и изделия.

Третий параграф четвертой главы посвящен методам проектирования оптимальных технологических режимов гидропрессования.

В пятой главе диссертации исследуется процесс гидромеханического обжима полых заготовок, который отличается от обычного обжима тем, что производится в среде жидкости высокого давления. Основные его преимущества состоят в том, что рабочая жидкость повышает устойчивость заготовки и снижает силы контактного трения. Это позволяет достичь больших значений коэффициента обжима

и получить более высокий, чем при обычном обжиге, уровень механических свойств изделий.

Теоретическому исследованию процесса обжига посвящены работы Аверкиева Ю.А., Бебриса А.А., Ильшина А.А., Малинина Н.Н., Попова Е.А., Ренне И.П. и др. Математическая модель, разработанная в диссертации, отличается от известных, во-первых, тем, что учитывает особенности, связанные с жидкостью высокого давления (дополнительные нагрузки; возможности устойчивого деформирования, когда заготовка осаживается до входа в матрицу), а, во-вторых, тем, что базируется на разработанной во второй главе модели структурно-неоднородного материала.

Расчет напряженно-деформированного состояния заготовки выполнен в приближении безмоментной теории оболочек.

Теоретический и экспериментальный анализ показывает, что предложенная модель адекватно описывает процесс гидромеханического обжига и позволяет определить силовые параметры, геометрию и механические свойства изделий, а также исследовать устойчивость материала при деформации. Погрешность в определении усилий не превышает 15...20%. Ошибка в величине толщины стенки и относительного удлинения на ранних стадиях обжига находится в пределах 5%, а на поздних стадиях (в режиме осадки цилиндрической части заготовки) не превышает 15...17%.

В заключительной части пятой главы описаны устройства для гидромеханического обжига, и разработаны математические модели, позволяющие исследовать различные режимы их работы.

В шестой главе диссертации исследуется процесс осадки цилиндрических заготовок в среде жидкости высокого давления — гидромеханическая осадка. В этой технологической операции можно реализовать очень благоприятное напряженно-деформированное состояние (интенсивный сдвиг под регулируемым давлением), в значительной степени улучшающее структуру и механические свойства обрабатываемого материала. Особый интерес представляет гидромеханическая осадка порошковых и пористых заготовок, позволяющая получить качественные полуфабрикаты для последующих переделов.

Изучению гидромеханической осадки посвящены работы Векшина В.С., Лаптева А.М., Перельмана В.Е., Штерна М.Б. и др. Отличие данного исследования состоит в том, что оно проводилось на основе предложенной модели структурно-неоднородного материала. Благодаря

этому была создана математическая модель, которая позволила не только оценить силовые параметры процесса, но и определить условия деформации без разрушения заготовки.

При теоретическом исследовании обнаружен интересный эффект, состоящий в том, что в режиме осадки с постоянной величиной давления рабочей жидкости пористость во всем объеме заготовки выравнивается и принимает значение, однозначно определяемое указанным давлением. Физическая причина этого эффекта состоит в установлении равновесия между процессами уплотнения и разрыхления материала.

Кроме того, анализ разработанной модели показывает, что для порошковых систем и пористых материалов со слабо упрочняющимся каркасом процесс выравнивания пористости по объему заготовки может быть сорван потерей устойчивости однородной деформации.

Экспериментальные исследования, выполненные В.С.Тютенко и А.П.Борзенко на заготовках из спеченной быстрорежущей стали ИОРЕМБ, подтвердили эти выводы.

Указанный эффект может быть использован на практике для получения качественных равноплотных заготовок с заданной величиной пористости.

С целью обеспечения устойчивости однородной деформации в главе предложено специальное устройство — упругий телескопический контейнер, состоящий из двух цилиндрических пружин (на это устройство получено авторское свидетельство).

Последняя, седьмая, глава диссертации посвящена вопросам автоматизированного проектирования процессов ОМД в рамках предложенной концепции взаимодействия физических исследований с технологическими разработками.

Общие выводы

I. Выводы по теории пластического деформирования и разрушения материалов под давлением

1.1. Основные эффекты влияния давления на пластическую деформацию и разрушение материалов могут быть отражены в рамках следующей физической модели:

представительный объем материала состоит из большого числа связанных между собой структурных элементов, которые при деформации могут смещаться и вращаться друг относительно друга, дробиться и пластически деформироваться, подстраиваясь и адаптируясь друг к

другу;

при совместной деформации структурных элементов, в общем случае, возможна лишь частичная их адаптация с образованием из-за этого зазоров между ними;

способность к адаптации определяется эффективностью действующих механизмов деформации;

ограничения на согласованную деформацию структурных элементов количественно характеризуются величиной параметра α (коэффициента внутреннего трения); если имеется возможность полной адаптации, то $\alpha = 0$; в противном случае $\alpha > 0$, и величина этого параметра растет с ростом числа ограничений на деформацию структурных элементов;

имеется ряд критических давлений таких, что в интервалах между ними α от давления не зависит, а при переходе через них скачком убывает при возрастании давления; под давлением, превышающим максимальное критическое значение, $\alpha = 0$.

1.2. Функция нагружения материала, описанного в п.1.1, представляет собой "гибрид" функций нагружения для пористых и сыпучих материалов. След поверхности пластичности, соответствующей этой функции нагружения, в зависимости от значений параметров модели и величины пористости может изменяться от эллипса, смещенного в отрицательном направлении оси гидростатических напряжений, до кривой типа осевого сечения груши.

Физическая причина несимметричности следа поверхности пластичности относительно начала координат состоит в невозможности полной адаптации структурных элементов материала друг к другу при их совместной деформации.

Определяющие соотношения, построенные на базе предложенной функции нагружения и условия градиентальности, дают возможность изучать с единых позиций деформацию под давлением порошковых, пористых и компактных материалов и позволяют описать целый ряд физических эффектов. Среди них наиболее важными являются: зарождение и залечивание дефектов при пластической деформации под давлением; наличие неустраняемой пористости при гидростатическом обжатии порошкового и пористого материалов в случае, если не происходит смены механизма деформации; наличие равновесной пористости при пропорциональном нагружении под давлением; повышение устойчивости "материального" типа под давлением; повышение пластичности материала под давлением; наличие критических давлений, при

превышении которых реализуется состояние с неограниченной пластичностью.

1.3. В рамках разработанной теории физической причиной неустранимой пористости является исчерпание возможности пластической аккомодации отдельных структурных элементов, а равновесной пористости - равная интенсивность процессов разрыхления и уплотнения.

Потеря устойчивости "материального" типа связана с разупрочнением материала из-за интенсивного разрыхления. При этом повышение устойчивости под давлением обусловлено с одной стороны интенсификацией процессов уплотнения, а, с другой стороны - включением новых каналов пластической аккомодации отдельных структурных элементов (снижением величины α).

Возможность макроскопического описания ансамбля микронесплошностей, возникающих при деформации поликристаллического материала, одним скалярным параметром (величиной пористости) обусловлена автомодельность в развитии ансамбля (скейлинг). Автомодельность связана с тем, что микронесплошности представляют собой перколяционные кластеры.

1.4. Параметры модели для порошковых и пористых материалов могут быть определены по результатам двух испытаний: гидростатического обжатия и одноосного сжатия в закрытой матрице.

Параметры модели для компактного материала могут быть определены по величине его пластичности в испытаниях на кручение и одноосное сжатие.

1.5. Сопоставление результатов расчета с экспериментом показывает, что, в довольно широких интервалах варьирования давления и деформации, для различных схем нагружения коэффициент внутреннего трения α остается постоянным. Его изменение связано со сменой ведущих механизмов деформации структурных элементов материала.

1.6. Характерные значения коэффициента внутреннего трения для компактных поликристаллических материалов лежат в диапазоне $\alpha \sim 10^{-3} \div 10^{-2}$, а для порошковых материалов - $\alpha \sim 0,1 \div 1,0$. Такое различие в значениях α объясняется тем, что в компактных поликристаллических материалах, в отличие от порошковых, структурные элементы связаны друг с другом по всей поверхности, причем связи выдерживают высокие растягивающие напряжения. Это приводит к тому, что в структурных элементах возникает напряженное

деформированное состояние, инициирующее более эффективную работу каналов пластической аккомодации.

2. Выводы по модели контактного трения при обработке материалов давлением

Разработана континуальная модель полужидкостного трения, которая базируется на представлении зоны контакта в виде "третьего тела", с функцией нагружения, имеющей вид, указанный в п.1.3. Модель учитывает зависимость напряжения трения от величины предварительного смещения контактирующих поверхностей. Это важно при моделировании нестационарных процессов обработки давлением, в которых имеются зоны прилипания и торможения (таких, например, как осадка, прокатка). В этом случае удается поставить связанную задачу, в которой напряжение трения заранее не задается, а определяется в ходе ее решения.

3. Выводы по системе моделей для исследования процессов гидростатической обработки материалов

3.1. Разработана система математических моделей для исследования и проектирования технологического процесса гидропрессования. Модели позволяют изучить формирование показателей качества продукции (прочностные и пластические характеристики материала, шероховатость поверхности изделия), исследовать динамическую устойчивость процесса, определить условия деформации без макроскопического разрушения заготовки, оценить энерго-силовые параметры процесса.

3.2. Разработана модель технологического процесса гидромеханического обжима, позволяющая исследовать изменение геометрических размеров заготовки, изучить формирование прочностных и пластических характеристик деформируемого материала, определить момент появления полос локализованной деформаций в стенке заготовки, оценить энерго-силовые параметры процесса, исследовать различные режимы работы установок для гидромеханического обжима.

3.3. Разработана математическая модель технологического процесса гидромеханической осадки порошковых и пористых материалов, которая позволяет исследовать изменение пористости и геометрических размеров заготовки, определить моменты потери устойчивости материала и разрушения заготовки, оценить энерго-силовые показатели процесса.

3.4. Качественный анализ разработанных математических моделей указывает на наиболее эффективные пути управления характеристиками

технологических процессов и на резервы повышения качества выпускаемой продукции.

Расчетные соотношения, полученные на базе разработанных моделей, позволяют оценить численные значения показателей, характеризующих процесс и изделие, что, в свою очередь, является исходной информацией для выбора оборудования и проектирования оснастки.

4. Выводы по методам расчета и проектирования процессов гидростатической обработки материалов

4.1. Предложен подход к автоматизированному проектированию процессов обработки материалов давлением, состоящий в том, что вместо единого алгоритма проектирования имеется набор проектных операций, из которых автоматически собирается цепочка, элементы и связи которой определяются конкретными условиями производства.

4.2. Предложенные устройства для определения относительного расположения входного и выходного отверстий матриц и моделирования плавных переходов от сечения заготовки к сечению профиля позволяют получать матрицы для гидропрессования, имеющие высокую стойкость и обеспечивающие равномерную деформацию и повышенную пластичность металла при течении его через матрицу.

4.3. Предложенная конструкция матриц со специально заданным распределением длины калибрующего пояса позволяет снизить давление гидропрессования и получить изделия с необходимым распределением твердости на поверхности.

4.4. Предложенный метод анализа чувствительности экспериментального решения позволяет, на основании результатов экспериментов через базовую матрицу, так скорректировать ее форму, чтобы улучшить те или иные характеристики процесса и изделия.

4.5. Предложенный упругий телескопический контейнер позволяет реализовать режим гидромеханической осадки, обеспечивающий получение полуфабрикатов с заданной, однородной по объему пористостью.

Основные положения диссертации освещены в 75 научных публикациях автора, в том числе:

1. Кулеско Н.А., Палант П.А., Бейгельзимер Я.Е., Гетманский А.П. Приближенное решение задачи о радиальном течении пластической массы // ДАН УССР.-Сер.А.-1979.-№6.-С.441-443.

2. Исследование свойств и структуры решения задачи о гидроэкструзии /Я.Е.Бейгельзимер, Н.А.Кулеско, П.А.Палант,

Н.Е.Шихова// ДАН УССР.-Сер.А.-1980.- №8.-С.34-36.

3.Бейгельзимер Я.Е., Носовицкая Г.И., Палант В.А.
Контактно-гидродинамическая теория смазки при гидроквуструзии//
ДАН УССР.-Сер.А.-,1981.-№6.-С.30-33.

4.Бейгельзимер Я.Е., Палант В.А. Структура соленоидального поля в задаче о гидроквуструзии// Математическая физика. Республ. межвед. сб. Вып. 31.-К.: Наукова думка, 1981.-С.66-67.

5.Системный анализ и оптимизация процесса гидропрессования профильных изделий /Я.Е.Бейгельзимер, А.П.Гетманский, М.А.Лойферман, Ю.А.Палант// Препринт ДонИТИ-83-18. - Донецк: Ротапринт ИЭП АН УССР, 1983.-70с.

6.Бейгельзимер Я.Е., Леонов И.А., Палант В.А. Классификация машиностроительных профилей в системе автоматизированной подготовки технологических процессов прессования // Изв. ВУЗов, Черная металлургия.-1984.-№7.-С.54-55.

7.Исследование допустимых значений управляющих параметров гидропрессования /Я.Е.Бейгельзимер, А.П.Гетманский, И.А.Леонов и др.//Изв. ВУЗов, Черная металлургия.-1985.-№2.-С.122-114.

8.Некоторые вопросы алгоритмизации расчетов процесса гидропрессования /Я.Е.Бейгельзимер, А.П.Гетманский,И.А.Леонов и др.//Изв. ВУЗов, Черная металлургия.-1985.-№8.-С.121-124.

9.Гетманский А.П., Бейгельзимер Я.Е., Вакс Л.Р. Гидромеханическая осадка пористой заготовки //Порошковая металлургия.-1986.-№2.-С.11-13.

10.Устройство для профилирования метричных каналов /Л.И.Алистратов, Я.Е.Бейгельзимер, А.П.Гетманский и др. //Машиностроитель.-1986.-№3.-С.44.

11.Матрица для гидропрессования с минимальной поверхностью формообразующей части /Я.Е.Бейгельзимер, А.П.Гетманский, И.А.Леонов, Ю.А.Палант //Кузнечно-штамповочное производство.-1986.-№8.-С.20-21.

12.Спусканик В.З., Бейгельзимер Я.Е. Исследование оптимальных условий гидропрессования заготовок //Препринт ДонИТИ-86-6.-Донецк: Ротапринт ИЭП АН УССР, 1986.-35с.

13.Критерий деформируемости пористого тела/Я.Е.Бейгельзимер, А.П.Гетманский, В.А.Палант и др.// Порошковая металлургия.-1986.-№5.-С.15-18.

14.Бейгельзимер Я.Е., Гетманский А.П., Алистратов Л.И. Условие пластичности для порошков твердосплавных смесей //Порошковая металлургия.-1987.-№3.-С.11-15.

15.Бейгельзимер Я.Е. Пластическая деформация пористых тел при малой пористости //Порошковая металлургия.-1987.-№3.-С.11-13.

16.Бейгельзимер Я.Е., Гетманский А.П., Палант В.А. О причине прерывистого вытекания в процессе гидропрессования//Изв. ВУЗов, Черная металлургия.-1987.-№4.-С.48-51.

17.Бейгельзимер Я.Е., Палант В.А. О пластическом изменении объема //Изв.ВУЗов, Черная металлургия.-1987.-№11.-С.54-57.

18.Спусканик В.З., Соколов Н.Л., Бейгельзимер Я.Е. Особенности и преимущества одного гидропрессования на криволинейных прессах //Кузнечно-штамповочное производство.-1987.-№1.-С.23-25.

19.Бейгельзимер Я.Е., Гетманский А.П. Некоторые вопросы

устойчивости гидроэкструзии длинномерных профилей // Влияние высоких давлений на вещество. Т.2. Физика и техника деформирования при высоких давлениях. - Киев: Наукова думка, 1987. - С.179-196.

20. Бейгельзимер Я.Е., Гетманский А.П. Модель развития пластических деформаций пористых тел в приближении теории протекания // Изв. ВУЗов, Черная металлургия. - 1988. - №10. - С.17-20.

21. Бейгельзимер Я.Е., Гетманский А.П. Анализ перехода микропластической деформации в макропластическую в приближении теории протекания // Пробл. прочности. - 1988. - №10. - С.66-68.

22. Бейгельзимер Я.Е., Гетманский А.П. Анализ изменения объема при пластическом деформировании // Обработка металлов давлением. - Свердловск: УПИ, 1988. - С.7-12.

23. Бейгельзимер Я.Е., Гетманский А.П., Алистратов Л.И. Об одной модели пористого тела // Технологическая и конструкционная пластичность. - Киев: ИГиМ АН УССР, 1988. - С.47-52.

24. Бейгельзимер Я.Е., Палант Ю.А., Бейгельзимер Э.Е. Перколяционная модель разрушения металла при пластической деформации // Изв. ВУЗов, Черная металлургия. - 1988. - №7. - С.166-167.

25. Бейгельзимер Я.Е., Гетманский А.П., Палант Ю.А. Использование мембранной аналогии в решении некоторых задач ОМД // Изв. ВУЗов, Черная металлургия. - 1988. - №9. - С.66-68.

26. Алексеев В.П., Бейгельзимер Я.Е., Спусканк В.З. Исследование процесса выдавливания полых изделий // Изв. ВУЗов, Машиностроение. - 1989. - №2. - С.153-157.

27. Бейгельзимер Я.Е., Лагутин В.Н., Мартинов А.Г. Получение изделий с заданным распределением твердости по поверхности методом гидропрессования // Кузнечно-штамповочное производство. - 1989. - №9. - С.10-11.

28. Бейгельзимер Я.Е. Экспериментально-расчетный метод определения напряженно-деформированного состояния заготовки при прессовании и волочении // Изв. ВУЗов, Машиностроение. - 1989. - №10. - С.114-116.

29. Неронин Н.К., Бейгельзимер Я.Е., Баранов С.Н. Возможность механического ском напряжений для интенсификации процессов химической технологии // ДАН СССР. - 1989. - т.306. - №1. - С.150-153.

30. Investigation of pressure distribution in working space between diamond anvils by change of properties of a deformable spacer // В.И. Березнев, А.П. Гетманский, В.М. Ефрос, Я.Е. Бейгельзимер, Л.В. Лоладзе // Proc. XI AIRAPT Int. Conf. High Pressure science and technology. - Kiev. - 1989. - v.4. - p.19-23.

31. Роль сверхвысоких давлений в процессе пластического разрыхления металлов при их деформации в АНД с алмазными наковальнями // В.И. Березнев, Л.В. Лоладзе, Я.Е. Бейгельзимер и др. // Сверхтвердые материалы. - 1990. - №4. - С.38-42.

32. Beresnev V.I., Loladze L.V., Efros V.M., Beigelzimer Ya.E. On peculiarities of plastic loosening of gasket materials at pressure generation by diamond anvil technique // High Pressure Research. - 1990. - Vol.5. - p.797-800.

33. Исследование гидропрессования пакетной заготовки // В.Г. Сынков, О.Е. Глауберман, Я.Е. Бейгельзимер, С.Г. Сынков // Порошковая металлургия. - 1990. - №6. - С.14-16.

34.Тютенко В.С., Борзенко А.П., Бейгельзимер Я.Е. Анализ процесса гидромеханической осадки пористой заготовки //Порошковая металлургия.-1990.-№4.-С.8-11.

35.Алексеев В.П., Бейгельзимер Я.Е., Богданов В.А. Анализ работы и расчет параметров устройства для холодного гидромеханического обжима //Изв. ВУЗов, Машиностроение.-1990.-№7. С.80-84.

36.О выборе рациональной технологии гидропрессования фасонных профилей /Я.Е.Бейгельзимер., А.П.Гетманский., Н.А.Кулеско и др. //Изв. ВУЗов, Черная металлургия.-1991.-№4.-С.82-84.

37.Бейгельзимер Я.Е. О проектировании процессов ОМД на основе анализа чувствительности //Изв. ВУЗов, Черная металлургия.-1991.-№7.-С.39-41.

38.Силовые условия гидропрессования полых заготовок на подвижной оправке /В.З.Спусканик, Я.Е.Бейгельзимер, И.А.Леонов и др. //Изв. ВУЗов, Черная металлургия.-1991.-№9.-С.50-52.

39.Бейгельзимер Я.Е., Константинова Т.Е., Ляфер Е.И. Об уплотнении порошковых материалов под гидростатическим давлением //Порошковые инструментальные стали. -Киев: ИПМ АН Украины, -1992.-С.69-74.

40.Бейгельзимер Я.Е., Тютенко В.С., Борзенко А.П. Об одном способе получения равноплотных цилиндрических заготовок //Там же.-С.74-77.

41.Бейгельзимер Я.Е., Эфрос Б.М. О вязком разрушении материалов под давлением //Физика и техника высоких давлений.-1992.-т.2.-№3.-С.55-65.

42.Анализ особенностей процесса холодного гидромеханического обжима /В.П.Алексеев, Я.Е.Бейгельзимер, В.А.Богданов и др. // Физика и техника высоких давлений.-1992.-т.2.-№1.-С.94-98.

43.Beigelzimer Ya., Loladze L., Efros B. On viscous destruction of materials under pressure // Recent trends in high pressure research. Proceedings of the XII AIRAPT International Conf. of High Pressure Science and Technology. New Delhi: IBM Publ. Co., Pvt. Ltd, 1992.-p.734-736.

44.Бейгельзимер Я.Е., Миланин А.А., Спусканик В.З. Об одной континуальной модели контактного трения в процессах обработки металлов давлением // Трение и износ.-1993.-№3.-С.471-478.

45.Операционный подход к автоматизированному проектированию технологий ОМД / Бейгельзимер Я.Е., Спусканик В.З., Алексеев В.П. и др. //Физика и техника высоких давлений.-1993.-т.3.-№3.-С.146-151.

Новизна технических решений защищена следующими авторскими свидетельствами и положительными решениями по заявкам на изобретения:

1.Бейгельзимер Я.Е., Гетманский А.П., Лоферман М.А., Носовицкая Г.И. Устройство для построения калибровки инструмента. А.с. 1217519.- Опубл. в БИ №17, 1988.

2.Бейгельзимер Я.Е., Лагутин В.Н., Мартынов А.Г. Матрица для прессования профилированных заготовок и способ ее изготовления. А.с.1389989.- Опубл. в БИ №15, 1988.

3. Богданов В.А., Спусканжк В.З., Алексеев В.П., Бейгельзимер Я.Е. Устройство для гидропрессования с противодавлением. А.с.1393517.-Опубл. в БИ №17, 1988.

4. Бейгельзимер Я.Е., Борзенко А.П., Гетманский А.П., Маныгин Г.Н. Контейнер для осадки заготовок. А.с.1706738.-Опубл. в БИ №3, 1992.

5. Бейгельзимер Я.Е., Богданов В.А., Алексеев В.П., Спусканжк В.З. Способ определения параметров напряженно-деформированного состояния материала при его пластической деформации. Положительное решение от 23.10.91 на заявку №4784821.

6. Бейгельзимер Я.Е., Алексеев В.П., Богданов В.А., Спусканжк В.З. Вращающаяся волока. Положительное решение от 28.10.91 на заявку №4936249.



Подписано в печать 27.12.93 г. Формат 60 x 84 1/16. Бумага типограф.
Офсетная печать. Усл. печ. л. 2,0. Усл. кр.-отт. 2,0. Уч. изд. л. 1,7.
Тираж 100 экз. Заказ №4-7042

ЗАОИ4, Донецк, ул. Р.Люксембург, 72

ДМАШ, З40050, Донецк, ул.Артема, 96

AB 29.044

AB 29.044