

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ
им. И.Н.ФРАНЦЕВИЧА

На правах рукописи
УДК 621.762

ШТЕРН МИХАИЛ БОРИСОВИЧ

МЕХАНИКА ПЛАСТИЧЕСКОГО И НЕЛИНЕЙНО-ВЯЗКОГО ТЕЧЕНИЯ
ПОРИСТЫХ ТЕЛ В ПРОЦЕССАХ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Специальность: 05.16.06-Порошковая металлургия и композици-
онные материалы
01.02.04-Механика деформированного твердого
тела

• А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

№ 26. 498

Работа выполнена в Институте проблем материаловедения АН Украины.

Официальные оппоненты

доктор технических наук,
профессор

Г. М. Жданович

доктор технических наук,
профессор

В. Г. Литвинов

доктор технических наук,
профессор

Л. И. Тучинский

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00825617 (Т)

Ведущее предприятие : донецкий физико-технический институт АН Украины

Защита состоится 1 марта 1992 года в 10 часов на заседании специализированного Совета при Институте проблем материаловедения АН Украины.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМ АН Украины.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу: 252680, ГСП, Киев, ул. Кржижановского, 3, Институт проблем материаловедения АН Украины.

Автореферат разослан " " "

1992 года.

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН УРСР

Ученый секретарь
специализированного Совета
доктор технических наук

Р. В. Минакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Возникновение новых наукоемких технологий в материаловедении, наблюдаемое в последнее время, не снизило роли процессов деформационной обработки. Низкая металлоемкость, обеспечение заданных размеров и формы изделия в сочетании с возможностью дополнительного упрочнения в ходе деформирования лишают их альтернативы в порошковой металлургии конструкционных и инструментальных материалов. Методы деформационной обработки в современных технологиях порошковой металлургии встречаются по крайней мере дважды: на стадии получения сырой прессовки и на финишной стадии при получении готового изделия.

При проектировании данных процессов возникают два типа проблем: определение интегральных усилий, возникающих при взаимодействии деформируемого тела с пресс-инструментом, а также управление перераспределением массы между отдельными участками детали. В отличие от задач обработки металлов давлением главным объектом внимания задач порошковой металлургии является не напряженно-деформированное состояние, а поля тех параметров, которые определяют свойства порошковых изделий, а также соотношение между уплотнением и изменением формы.

К моменту начала исследований основным средством анализа процессов деформационной обработки являлась дискретно-контактная теория прессования порошков, не позволявшая с единых позиций рассматривать прессование порошков и деформирование пористых тел. Между тем необходимость наличия общей точки зрения диктовалась тем, что в качестве объекта деформирования использовались не только порошки, но и пористые тела (горячая и холодная штамповка, экструзия и др.)

Формирование общей точки зрения на поведение порошков и пористых тел в уплотняющих технологиях порошковой металлургии, а также разработка методов количественного и качественного анализа составили главную задачу, которая была поставлена перед диссертантом.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с рабочими планами Института проблем материаловедения АН Украины. Почти все ее фрагменты включены в отчетные документы по тем планам и комплексным программам, в выполнении которых Институт принимал участие.

Цель работы: Разработать научные основы, физические и механические модели и методы континуального описания поведения порошков и пористых материалов при их уплотняющей обработке с целью получения изделий сложной формы; создать методы качественного и количественного анализа процессов деформирования пористых тел.

В диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Установить возможности и границы континуального рассмотрения деформаций пористых и дисперсных материалов, разработать теорию нелинейно-вязкого и пластического их течения.

2. Установить влияние схемы деформации и механизма течения твердой фазы пористых тел на соотношение между уплотнением и формоизменением, а также на силовые и энергетические параметры.

3. Разработать методы аналитического контроля и управления распределением плотности при радиальном обжатии и осевом уплотнении в жестких матрицах втулок; установить роль внешнего трения и схемы прессования.

4. Разработать методы расчета распределения плотности и анализа течения порошка при получении порошковых изделий, ограниченных криволинейными и ступенчатыми поверхностями в жестких матрицах на многосходовых прессах.

5. Разработать теорию пластичности пористых тел, склонных к порообразованию в процессе деформации вследствие неоднородности твердой фазы.

6. Исследовать условия возникновения полос сдвига при деформации порошков и пористых тел, сформулировать критерии их разрушения при пластической деформации.

На защиту выносятся

1. Общие принципы построения теории пластичности пористых тел и уплотняемых порошков;

2. Теория пластичности и нелинейно-вязкого течения пористых материалов, изменение объема которых обусловлено изменением объема пор;

3. Установленное автором перекрестное влияние шаровых и девиаторных компонентов напряжений и деформаций и его связь с механизмом течения матрицы;

4. Методы контроля и управления распределением плотности при радиальном обжатии втулок, осевом уплотнении в жестких матрицах изделий простой и сложной формы с учетом одновременного движения

нескольких пресс-элементов;

5. Теория пластичности пористых тел, учитывающая порообразование и описывающая эффекты разнсопротивляемости условия возникновения локализации сдвига в пористых телах и критерии их разрушения при пластической деформации.

Научная новизна

Сформулированы общие принципы конструирования моделей пластического и нелинейно-вязкого течения изотропных необратимо-уплотняемых материалов.

Общие соотношения, описывающие их течение, сформулированы на основе представлений микронеоднородного континуума.

Установлен эффект дилатансии 1-го рода, заключающийся в перекрестном взаимовлиянии шаровых и девиаторных напряжений и скоростей деформаций, и его связь с механизмом течения матрицы.

Определена зависимость энергосиловых параметров уплотнения от схемы деформации и, в частности, немонотонность осевого давления при двухосных деформациях, установлена связь этой зависимости с реологией матрицы.

Теоретически установлена зависимость распределения плотности и давления прессования от схемы прессования в жестких матрицах, предложены новые методы расчета распределения плотности - метод проникаемых элементов и метод проникаемых плоских сечений.

Сформулирована теория пластичности пористых тел, учитывающая порообразование, разнсопротивляемость и дилатансию второго рода (вследствие неоднородности матрицы).

Установлены схемы деформаций, допускающие возникновение полос сдвига при деформировании пористых тел, определена их ориентация, сформулирован критерий разрушения при пластической деформации.

Все указанные положения впервые получены автором.

Практическая ценность

Вытекающие из сформулированных моделей методы оценки энергосиловых параметров процессов уплотнения просты и могут служить основой выбора оборудования и конструирования оснастки.

Развитые в работе качественные методы анализа допускают непосредственное использование при выборе заготовок под дальнейшую обработку, а также схемы прессования.

Предложенные автором методы проникаемых элементов и проникаемых плоских сечений, служат основой методов компьютерной имитации процессов получения изделий сложной формы на многоходовых

прессах. Они позволяют определять схемы прессования и разбиения детали на отдельные элементы, прессуемые разными пуансонами так, что распределение плотности в детали максимально приближается к заданному.

Сформулированные критерии разрушения при пластической деформации позволяют выбирать такие схемы деформирования, которые при максимально возможной деформации пористых тел не приведут к их разрушению.

Реализация результатов работы

Выводы и рекомендации результатов работы использованы на Орловском заводе "Продмаш", в ОКБ "Кристалл" (Йошкар-Ола), в Специальном конструкторском бюро кузнечных машин и автоматических линий (Воронеж), на Белорусском республиканском научно-производственном объединении "Порошковая металлургия" (Минск).

Апробация работы

Основные результаты и положения диссертации докладывались на следующих симпозиумах, конференциях и совещаниях:

Хельсинки - июнь 1990, май 1991 г.

Будапешт - ноябрь 1982, ноябрь 1988 г.

София - март 1986 г.

Братислава - март 1987 г.

Пвикау (Германия) - май 1988 г.

Попрад (Чехословакия) - май 1990 г.

на Всесоюзных конференциях по порошковой металлургии.

Ташкент - 1979 г.

Киев - 1985 г.

Киев - 1992 г.

на Республиканской конференции по порошковой металлургии

Донецк - 1988 г.

на межотраслевом семинаре Северо-западного региона по порошковой металлургии, Ленинград 1986, 1987, на Всесоюзном семинаре "Реологические модели и процессы деформирования порошковых пористых и композиционных материалов", 1981, 1984, 1986, 1989, 1990, на Всесоюзном семинаре "Структурные аспекты локализации деформаций", 1988, 1991, на семинаре Института проблем механики РАН, 1992.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, семи глав, выводов, списка литературы, изложена на 32 л. машинописного текста, содержит 64 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Порошки металлов и керамики, материалы, полученные на их основе, а также твердые тела, содержащие дефекты типа пор, обнаруживают при деформационной обработке ряд общих закономерностей, выходящих за рамки традиционных представлений реологии и механики. Внимание, уделявшееся многими исследователями данной проблеме, привело к возникновению к середине 80-х годов нового научного направления в материаловедении - механики и реологии дисперсных и пористых материалов. Впервые, однако, гипотеза сплошности была сформулирована в работах М. Ю. Бальшина. Затем континуальные представления используются В. В. Скороходом при формулировке реологической теории спекания и М. С. Ковальченко при анализе динамического горячего уплотнения. Последовательное применение при анализе холодного прессования континуальные методы впервые находят в работах Г. М. Ждановича, У. Шварца, Г. Вейнстина, а также О. В. Романа и В. Е. Перельмана.

Задача рассматриваемого направления - описание поведения указанных материалов на макроскопическом уровне. В связи с этим рабочий аппарат теории использует представления и понятия континуума. В то же время, в отличие от традиционных моделей континуума, главное внимание уделяется не исследованию напряженно-деформированного состояния, а изучению поведения параметров, характеризующих состояние материала. Все они, также как напряжение, деформации и температура, определяются путем осреднения по соответствующим элементам структуры. Поры, содержащиеся в материале, рассматриваются как непрерывная фаза, наделенная возможностью необратимо изменять объем. Другая фаза, называемая в дальнейшем твердой - несжимаема. Допускается, однако, ее неоднородность, в том числе, сосуществование различных ее состояний, например, жидкого при высоких температурах обработки, а также наличие включений с иными свойствами. Используется концепция представительного элемента, в соответствии с которой точка континуума отождествляется с областью, размеры которой малы по сравнению с размерами образца, но велики по сравнению с отдельными структурными элементами. Все фазы представлены в данной области с различными концентрациями. Фазовый состав представительного элемента определяется внешними условиями и свойствами среды. Для каждого элемента и для материала в целом справедливы все основные законы механики и термодинамики континуума.

Особое внимание в данной главе уделено пластическому течению. Анализ трехмерной пластичности материалов, допускающих необратимые объемные деформации, проводится с позиций термодинамики необратимых процессов с использованием общепринятых в физике континуума квазитермодинамических постулатов. Устанавливается форма и структура определяющих соотношений, связывающих напряжения, скорости деформаций и плотность. В изотропном случае физические определяющие соотношения формулируются относительно среднего давления P , интенсивности касательных напряжений τ , связывая их со скоростью объемных изменений e и изменений формы γ . При этом

$$P = -\frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}, \quad \tau = \left[(\sigma_{ij} - p \delta_{ij}) (\sigma_{ij} - p \delta_{ij}) \right]^{1/2}$$

$$e = e_{ij} \delta_{ij}, \quad \gamma = \left[(e_{ij} - \frac{1}{3} e \delta_{ij}) (\sigma_{ij} - \frac{1}{3} e \delta_{ij}) \right]^{1/2}$$

Установлено, что физические определяющие уравнения при пластическом течении допускают две формулировки:

P и τ задаются как функции показателя деформированного состояния $S = e/\gamma$, удовлетворяющие уравнению

$$\frac{dP}{dS} S + \frac{d\tau}{dS} = 0 \quad (1)$$

причем $P(S)$ монотонна и ограничена, а $\tau(S)$ - имеет "колоколообразный" вид, достигая максимального значения при $S = 0$ (чистый сдвиг) (рис. 1).

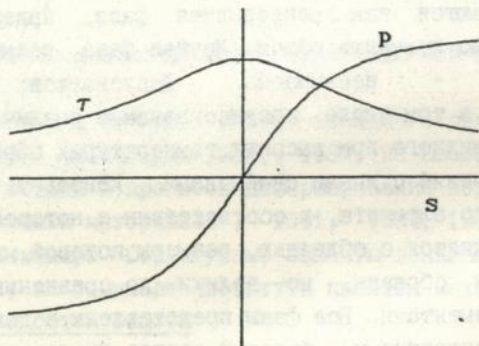


Рис. 1.

Задается уравнение

$$f(P, \tau, x_k) = 0, \quad (2)$$

которому в P - τ плоскости соответствует непрерывная замкнутая и выпуклая кривая, называемая контуром нагружения, где x_k - параметры, характеризующие состояние уплотняемого материала; связь между P , τ , e и γ дается соотношением (в случае гладкой f)

$$\frac{\partial f}{\partial P} \gamma - \frac{\partial f}{\partial \tau} e = 0 \quad (3)$$

Вектор с компонентами e , γ ортогонален контуру нагружения (рис. 2)

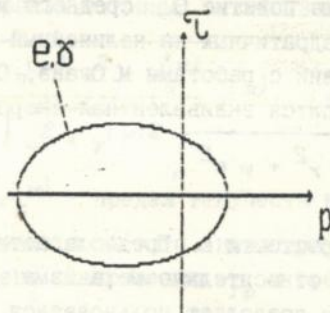


Рис. 2.

Контур нагружения материалов, склонных к объемным необратимым изменениям, и ориентация вектора скоростей деформаций.

Обе формулировки эквивалентны в случае гладкой функции f . Физические определяющие уравнения дополняются соотношениями подобия девиаторов напряжений и скоростей деформаций

$$\sigma_{ij} - P \delta_{ij} = \frac{\tau}{\gamma} \left(e_{ij} - \frac{1}{3} e \delta_{ij} \right) \quad (4)$$

Глава 2. На основании известных работ рассмотрены различные механизмы течения твердой фазы пористых тел при их необратимой деформации. Каждому механизму сопоставляется диссипативный потенциал $D^{(\mu)}$, являющийся функцией скоростей деформаций в материале

матрицы

$D^{(M)} = G [\gamma^{(M)}] = \int \tau^{(M)} d\gamma^{(M)}$,
 где $\tau^{(M)}$ - интенсивность касательных напряжений в матрице. Вводится представление об истинной скорости деформации матрицы как G - среднем от $\gamma^{(M)}$ по представительному элементу

$$\bar{\gamma} = G^{-1} \left[\frac{1}{V} \int G [\gamma^{(M)}] d\gamma^{(M)} \right], \quad (5)$$

где V - объем представительного элемента. Частным случаем (5) является среднеквадратичная истинная скорость деформации, введенная В. В. Скороходом для случая линейно-вязкого материала матрицы ($\tau^{(M)} = 2\eta^{(M)} \dot{\gamma}^{(M)}$, где $\eta^{(M)}$ - коэффициент сдвиговой вязкости матрицы). Введенное выше понятие G - среднего можно рассматривать как обобщение среднеквадратичных на нелинейный случай.

Далее, в соответствии с работами М. Оганэ, С. Шимы, В. З. Мидукова и Г. Л. Петросяна, вводится эквивалентная скорость деформаций

$$W = \frac{1}{\sqrt{1 - \epsilon}} \sqrt{\varphi \gamma^2 + \psi \epsilon^2}, \quad (6)$$

где φ и ψ - функции пористости ϵ . Предполагается, что зависимости φ и ψ от ϵ инвариантны относительно механизма течения материала матрицы и $W = \bar{\gamma}$. Это позволяет пользоваться при их определении методами механики линейного микронеоднородного континуума, а сама модель становится структурно чувствительной, поскольку таким образом отражает структуру порового пространства.

Дальнейшее рассмотрение в данной главе ограничивается симметричными пористыми материалами, удовлетворяющими условию $\sigma_{ij} (-e_{ij}) = -\sigma_{ij} (e_{ij})$ - изменение направления деформирования на противоположное влечет такое же изменение одноименной компоненты напряженного состояния. Для них формулировка определяющих уравнений основана на постулате В. В. Скорохода об однозначности диссипативного потенциала пористого тела

$$D = (1 - \epsilon) \int G [\gamma^{(M)}] dV = (1 - \epsilon) G(W) \quad (7)$$

Используемый далее принцип

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial D}{\partial e_{ij}} \quad (8)$$

позволяет конкретизировать определяющие соотношения симметричного пористого тела

$$\sigma_{ij} = \frac{\sigma}{W} \left[\left(\psi - \frac{1}{3} \varphi \right) \epsilon \delta_{ij} + \varphi e_{ij} \right], \quad (9)$$

где σ - эквивалентное напряжение, определяемое формулой

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{1 - \epsilon}} \sqrt{\frac{P^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\varphi}}$$

Преимущество предложенного пути построения определяющих уравнений состоит в возможности учета конкретного механизма течения (соответствующим выбором $D(W)$ и структуры порового пространства (функции φ и ψ)). Поведение описанного класса тел иллюстрируется на примере материала матрицы, свойства которого описываются

уравнением
$$\tau^{(M)} = \frac{\sqrt{4 \eta^{(M)} \alpha^2 + \sigma_S^{(M)}}}{\sqrt{\alpha^2 + \gamma^{(M)2}}} \gamma^{(M)},$$
 где α - скоростная

чувствительность, а $\sigma_S^{(M)}$ - предел текучести на сдвиг при $\alpha = 0$.

Рассматривается кручение пористого цилиндрического стержня под действием скручивающего напряжения $\tau_{r\varphi}$ и среднего давления P . В этом случае анализ выражения для скорости уменьшения пористости

$$\dot{\epsilon} = (1 - \epsilon) \frac{\alpha}{\varphi} \frac{P}{\sqrt{4 \alpha^2 \eta^{(M)2} + \sigma_S^2 - \frac{1}{1-\epsilon} \frac{P^2}{\psi} - \frac{1}{1-\epsilon} \frac{\tau_{r\varphi}^2}{\varphi}}}$$

приводит к выводу о влиянии касательных напряжений на скорость уплотнения. Указанный эффект тем заметнее, чем существеннее отклонение поведения матрицы от линейно-вязкого, т.е. чем больший вклад в ее течение вносит дислокационный механизм.

Предельным случаем рассматриваемого класса моделей является симметричный жестко-пластически упрочняющийся пористый материал. Его условие пластичности, вытекающее из (6) и (9), имеет вид

$$\frac{P^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\varphi} = (1 - \epsilon) \sigma_0^2(\omega) \quad (10)$$

где $\omega = \int_0^t W dt$, $\sigma_0(\omega)$ - зависимость деформационного упрочнения

твердой фазы (ω - имеет смысл накопленной в материале матрицы к моменту t деформации). Различные пути обоснования (10) предложены Р. Грином, Ж. Куном, М. Ояне, С. Шимой, В. З. Мидуковым, Г. Л. Петросяном, А. М. Лаптевым, И. Ф. Мартыновой, В. В. Скороходом, Л. И. Тучинским, Л. П. Велюгой, О. В. Романом, Е. В. Звонаревым, А. Ю. Смысловым, А. К. Григорьевым, А. И. Рудским, Г. Я. Гуном и другими исследователями. В. З. Мидуковым, В. Д. Рудем, О. Н. Шпицыным, а также Н. Гадалой установлено удовлетворительное совпадение (10) с экспериментальными данными, когда шаровая компонента P - сжимающая.)

Глава 3. С позиций развитых представлений рассматриваются двухосные деформации пористых тел. Рассмотрение ограничивается предположением об однородности напряженно-деформированного состояния. Проводится сравнительный анализ энергосиловых и кинематических параметров при уплотнении пористых тел осевым прессованием в жесткой матрице, свободной осадкой, радиальным деформированием при наличии и в отсутствии осевых ограничений, а также изостатическим прессованием. Установлена их зависимость от жесткости напряженно деформированного состояния. Накопленная необратимая деформация твердой фазы тем меньше, чем жестче схема деформирования - минимальна при изостатическом прессовании и максимальна при свободной осадке (рис. 3, кривая 1). Связь между плотностью и давлением прессования зависит от схемы деформирования S . При одной и той же плотности давление прессования является немонотонной функцией, достигающей экстремума при сжатии в пресс-форме (рис. 3, кривая 2).

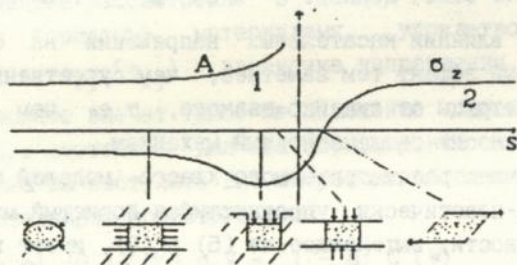


Рис. 3.

Зависимость работы уплотнения до заданной пористости (1) и осевого давления (2) от схемы деформирования.

Рассмотрена энергоемкость процессов получения изделий заданной плотности, если задана форма заготовки и ее плотность. Установлено, что среди возможных траекторий деформирования, обеспечивающих переход от заготовки к изделию, существует такая, которая связана с наименьшими энергозатратами. Ее кинематическая реализация близка к схеме Ю. Г. Дорофеева - уплотнение в пресс-форме, стенки которой обладают возрастающей жесткостью.

Установлено, что деформационное упрочнение пористых металлов зависит от схемы деформации (рис. 4). Если при схемах сжатия, используемых в порошковой металлургии, соответствующие кривые выпуклы вниз, при переходе к свободной осадке характер выпуклости меняется на противоположный. При растяжении симметричных пористых материалов соответствующая кривая располагается ниже, чем при сжатии и кроме того достигает экстремума. Его наличие находит

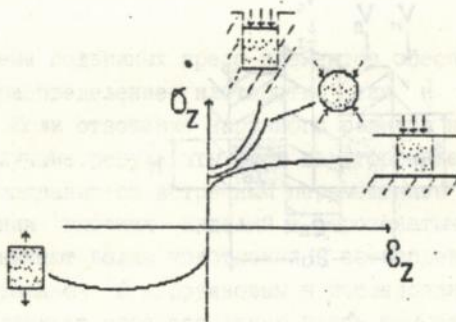


Рис. 4.

Зависимость деформационного упрочнения пористых тел от схемы деформаций.

объяснение в рамках концепции о двух факторах упрочнения пористых тел: физическом - за счет наклепа твердой фазы и геометрического за счет изменения пористости. При сжатии оба фактора действуют в одном направлении. При растяжении наклеп способствует росту напряжения течения, а рост пористости к его падению, при этом вначале преобладает физический фактор, а затем геометрический.

Глава 4. Анализируются процессы получения пористых втулок осевым прессованием в жестких матрицах и радиальным обжатием. Единственной причиной неоднородного распределения плотности при холодном прессовании является внешнее трение. Однако характер его влияния определяется движением отдельных пресс-элементов (схемой прессования). Рассмотрены следующие схемы прессования: 1 - одностороннее, 2 - двустороннее, 3 - встречное перемещение матрицы и стержня, 4 - прессование при покое стержня, когда матрица движется вдвое медленнее верхнего пуансона. В предположении о малости коэффициента внешнего трения установлены аналитические аппроксимации для распределения средней по сечению втулки пористости по высоте и выражения для давления прессования

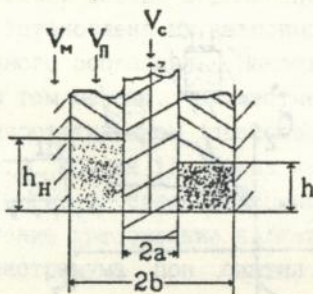


Рис. 5.

К прессованию втулки осевым прессованием
в жесткой матрице

$$1. V_M = V_C = 0$$

$$\epsilon = \epsilon_{cp} + \lambda \frac{P_{\sigma}}{P_{oc}} \frac{2z - h}{b-a}$$

$$P = P_{oc} + \lambda P_{\sigma} \frac{h}{b-a}$$

$$2. V_M = V_C = \frac{1}{2} V_n$$

$$\sigma = \sigma_{cp} + 2\lambda \frac{P_{\sigma}}{P_{\sigma c}} \left[\frac{z - \frac{h}{2}}{b-a} - \frac{h}{4} \right]$$

$$P = P_{\sigma c} + \lambda P_{\sigma} \frac{h}{2(b-a)}$$

$$3. V_M = 0, \quad V_c = V_n$$

$$\sigma = \sigma_{cp} + \lambda \frac{P_{\sigma}}{P_{\sigma c}} \frac{2z - h}{b+a}$$

$$P = P_{\sigma c} + \lambda P_{\sigma} \frac{h}{b+a}$$

$$4. V_M = -\frac{1}{2} V_n, \quad V_c = 0$$

$$\sigma = \sigma_{cp} + 2\lambda \frac{P_{\sigma}}{P_{\sigma c}} \left[\frac{bz + a}{b^2} \left| \frac{z - \frac{h}{2}}{a^2} \right| - h \frac{2b + a}{b^2 - a^2} \right]$$

$$P = P_{\sigma c} + \lambda P_{\sigma} \frac{2b + a}{b^2 - a^2} h$$

Применение подвижных пресс-элементов обеспечивает как более равномерное распределение плотности, так и снижение давления прессования. Если отношение наружного радиуса к внутреннему больше трех, наилучшие результаты дает двустороннее прессование, если меньше - прессование со встречным перемещением матрицы и стержня. При прессовании высоких изделий в шероховатых матрицах в объеме формовки возникают волны уплотнения и затвердевания. Волна уплотнения, обнаруженная Б. А. Друяновым и исследованная им и С. Е. Александровым, отделяет спрессованную часть брикета от неспрессованной и перемещается в направлении прессования со скоростью V , оцениваемой выражением

$$V_y \sim \left[1 + \frac{\sigma_{cp}}{\lambda \frac{h}{b-a} \frac{P_{\sigma}}{P_{\sigma c}}} \right] \dot{h}, \quad (11)$$

где \dot{h} - скорость верхнего пуансона. Волна затвердевания отделяет от прессовки ту область, которая примыкает к верхнему пуансону и в которой уплотнение прекращается. Ее скорость можно оценить выражением

$$V_s = \left[\frac{z_s}{h} + \frac{3}{4} \lambda \frac{h}{b-a} \frac{d}{\rho} \left(\frac{\rho}{\rho} \tau \right) \right] \dot{h}, \quad (12)$$

где z_s - координата фронта затвердевания, h_n - начальная высота. Полученные результаты привлечены к анализу такого распространенного явления как расслой, а точнее оценки его верхней границы.

Установлено, что плотность, обеспечивающая расслой, не является константой материала. Она зависит от конструктивных параметров детали и внешнего трения.

Исследовано распределение плотности при радиальном уплотнении втулок при наличии жесткой оправки. Наибольшая степень уплотнения достигается на внутренней поверхности, что соответствует данным, полученным А. В. Степаненко и Л. С. Богинским.

Глава 5. Рассматривается прессование порошковых изделий, ограниченных криволинейными или ступенчатыми поверхностями. Для определения распределения плотности и других параметров предложен новый метод расчета - метод проницаемых элементов (МПЭ). В отличие от метода конечных элементов (МКЭ), используемого в настоящее время достаточно широко, МПЭ использует сетку элементов, движение которой не зависит от текущего поля скоростей и определяется лишь изменением внешнего контура изделия. Преимущество МПЭ в данном случае обусловлено отсутствием необходимости регенерации сетки при больших деформациях, характерный для МКЭ, что в конечном счете существенно уменьшает время вычислений. Наряду с глобальным методом расчета разработаны упрощенные модификации МПЭ - "PLAST" для исследования процессов получения втулок с буртом и метод проницаемых плоских сечений, позволяющий определять среднюю по высоте плотность заданного участка изделия. В рамках МПЭ решены задачи о прессовании изделий 4-7 групп сложности (по классификации И. Д. Радомысельского и Г. Г. Сердюка) на прессовом оборудовании, допускающем автономное движение пресс-элементов. Численная модель, реализованная на компьютере, позволяет не только оптимизировать схему прессования, но также и определять оптимальное разбиение изделия на части, прессуемые разными пуансонами. Предложенная имитация процесса уплотнения может быть весьма полезна при использовании прессов фирм "DORST", "MAIER", "KATAKI", "YOSIZUKA", а также отдельных образцов отечественного оборудования.

Глава 6. Использование на практике таких схем деформации как холодная и горячая штамповка пористых заготовок, экструзия, а также методов, предложенных Ю. Г. Дорофеевым, сопровождается значительными растягивающими деформациями. В этом случае себя обнаруживают те факторы, которые при традиционных для порошковой металлургии схемах деформаций (изостатическое прессование, сжатие в пресс-форме) не оказывают влияния на сопротивление. К их числу относятся плоские макродефекты и декогезионные явления на границе матрица-включение или матрица-окисел. Изменение объема при таких схемах деформации обусловлено не только изменением объема отдельных пор, но также и изменением их количества. Естественно, что в этом случае условие симметрии свойств материала при изменении направления деформации на противоположное не соблюдается.

Для описания свойств таких материалов используется полярное представление шаровых и девиаторных компонент напряжений и скоростей деформаций

$$\begin{aligned}
 P &= \sqrt{1 - e} \sqrt{\psi} \sigma \cos \alpha, & e &= \sqrt{1 - e} \frac{1}{\sqrt{\psi}} W \cos \beta, \\
 \tau &= \sqrt{1 - e} \sqrt{\rho} \sigma \sin \alpha, & \gamma &= \sqrt{1 - e} \frac{1}{\sqrt{\rho}} W \sin \beta,
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

где α и β - фазы напряженного и деформированного состояния, соответственно (рис. 6).

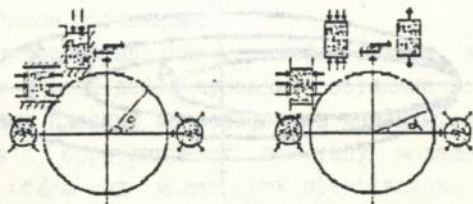


Рис. 6.
Геометрический смысл фаз напряженного
и деформированного состояний

АНБ им. В. Стефанова
АН УРСР

Определяющие соотношения в полярном представлении представляют собой систему функций $\sigma = \sigma(W, \beta)$ и $\alpha = \alpha(W, \beta)$. Если имеет место равенство $\alpha = \beta$, материал симметричен. В общем случае это не так. Условие существования диссипативного потенциала налагает ограничение на σ и α , которое для пластических деформаций имеет вид

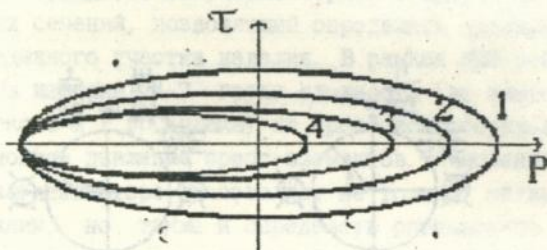
$$d\sigma + \sigma \operatorname{tg}(\beta - \alpha) d\alpha = 0 \quad (14)$$

Вводится представление о дефекте диссипации - изменении диссипации вследствие порообразования, определяемом формулой

$D = (1-\epsilon) \sigma W \sin(\alpha - \beta)$ и тождественно равно нулю в случае симметричного материала. Поскольку, как свидетельствуют экспериментальные данные, порообразование тем интенсивнее, чем схема деформаций ближе к чистому сдвигу, предполагается, что дефект диссипации пропорционален макроскопической скорости сдвига - $\sin(\alpha - \beta) = k \sin \beta$, где k - склонность к порообразованию. Уравнение контура нагружения в данном случае имеет вид

$$\left[P + \frac{k}{1+k} \sqrt{\psi} \sqrt{1-\epsilon} \sigma_0 \right]^2 + \frac{\tau^2}{(1-k^2)\phi} = (1-\epsilon) \frac{1}{(1+k)^2} \sigma_0^2 \quad (15)$$

Семейство контуров, соответствующих различным k , приведено на рис. 7.



1-k=0; 2-k=0,1; 3-0,45; 4-0,7

Рис. 7.

Контуры нагружения пористых тел при различных k .

При отличных от нуля k эллипсоид смещен влево относительно начала координат. Идея смещения эллипсоида текучести впервые предложена В. З. Мидуковым, хотя в ее основе лежат иные соображения, связанные с внутренними напряжениями. Модель, совмещающая эффект внутреннего трения по Кулону с пластической деформацией матрицы, предложенная Я. Н. Вейгельзимером, также приводит к смещению эллипса.

Чувствительным к знаку деформации несимметричного пористого материала оказывается не только предел текучести, равный при одноосном нагружении

$$\sigma_Z = \frac{\sqrt{\psi} \sqrt{1 - \epsilon} (1 - K)}{\sqrt{1 + 6 \frac{\psi}{\phi}} + \text{sign}(e_Z) K} \sigma_T^{(M)}, \quad (16)$$

где $\sigma_T^{(M)}$ - предел текучести материала матрицы на одноосное сжатие, но также и коэффициент поперечной деформации

$$\nu = \frac{\nu_0 - \frac{1}{\sqrt{3}} K \sqrt{1 - 2\nu_0} \text{sign}(e_Z)}{1 - \frac{1}{\sqrt{3}} K \sqrt{1 - 2\nu_0} \text{sign}(e_Z)}, \quad (17)$$

где ν_0 - коэффициент поперечной деформации пористого тела в отсутствии причин, приводящих к порообразованию. Согласно результатам В. В. Скорохода - $\nu_0 = (2 - 3\epsilon)/(4 - 3\epsilon)$. Анализ (17) показывает, что склонность к порообразованию замедляет поперечное сужение при одноосном растяжении.

Склонность к порообразованию, вообще говоря, переменная величина, поскольку в ходе деформирования состояние межфазной границы и концентрация плоских макродефектов изменяются. Кинетическое уравнение для K формулируется по типу моделей накопления повреждений и в общем виде может быть представлено следующим образом

$$\frac{dK}{dt} = A \epsilon + B \gamma, \quad (18)$$

где A и B функции S , ϵ , ω и K .

Скорость порообразования (e_{po}) можно оценить как разность скоростей изменения объема при наличии и в отсутствие вызывающих

его факторов

$$e_{\text{по}} = \frac{1}{\sqrt{\psi}} \sqrt{1 - e} W \left[\frac{K + \cos \alpha}{\sqrt{K^2 + 2 K \cos \alpha + 1}} - \cos \alpha \right] \quad (19)$$

В частности, скорость разрыхления вследствие действия касательных напряжений при отсутствии среднего давления оценивается формулой

$$e_{\text{по}} = \sqrt{\frac{e}{\psi}} \gamma \frac{K}{\sqrt{1 + K^2}} \quad (20)$$

Описанный эффект, называемый дилатансией второго рода, в отличие от дилатансии первого рода, обусловлен структурной неоднородностью материала матрицы.

Параметр K можно рассматривать как меру несовершенств порошкового материала, при оценке которого приемлемы методы М. Ю. Балшина и В. В. Скорохода. Он же может рассматриваться и как мера связности материала. В этом смысле сыпучий материал может рассматриваться как предельный случай несимметричного пористого тела.

Глава 7 посвящена исследованию локализованных деформаций - эффекту Людерса в пористых телах. Из общих принципов механики континуума устанавливается, что одним из необходимых условий возникновения локализованных сдвиговых деформаций является потеря физической устойчивости. Как было установлено во второй главе, данное явление обусловлено одновременным протеканием процессов, способствующих как упрочнению, так и разупрочнению. В частности, для материала, у которого $\varphi = 1$, а $\psi = 1/e$, момент потери физической устойчивости определяется равенством

$$\dot{\epsilon} = 2 e (1 - e) \frac{\sigma^v}{\sigma_s} W \quad (21)$$

Другое необходимое условие возникновения полосы при плоской деформации - это превышение скорости изменения формы над скоростью изменения объема. Это же условие обеспечивает гиперболичность уравнений идеально-пластического течения пористой среды.

Установлена ориентация полосы сдвига относительно главных направлений тензоров напряжений и скоростей деформаций. Угол наклона полосы к каждому из них определяется из уравнения

$$\text{tg } \delta = + \sqrt{\frac{1 - S_1}{1 + S_1}}, \quad (22)$$

где $S_1 = \frac{e_1 + e_2}{|e_1 - e_2|}$, e_1 и e_2 - главные удлинения.

В частности, при одноосном растяжении симметричного пористого ма-

териала $\text{tg } \delta = + \sqrt{1 - \frac{3}{2} \epsilon}$.

Таким образом, при плоском деформировании пористого материала угол наклона полосы к каждому из указанных направлений не только отличен от $\Pi/4$, как это имеет место в случае беспористого металла, но зависит от вида деформированного состояния. Указанные полосы исчезают, когда скорость изменения объема больше скорости изменения формы. В частности, локализация деформаций невозможна при схемах деформации, близких к гидростатическому сжатию.

На основе отмеченного эффекта физической неустойчивости пористого материала может быть сформулирована концепция разрушения при пластической деформации. Моментом потери устойчивости при разных траекториях пропорционального нагружения соответствует в $P-\tau$ плоскости кривая, объемлющая контур нагружения и, в отличие от него, не являющаяся замкнутой. Кривая (рис. 8) имеет вертикальную асимптоту, расположенную несколько правее нормали к контуру нагружения в той его точке, где $\epsilon=0$. На самой кривой имеются два участка: слева от точки, где $\epsilon=0$ располагается область напряженных состояний, при которых разрушению предшествует локализованный сдвиг. Справа от нее располагаются точки, соответствующие напряженным состояниям, при которых разрушение контролируется иным механизмом. Описанная картина разрушения качественно согласуется с картой механизмов разрушения, предложенной Эшби.

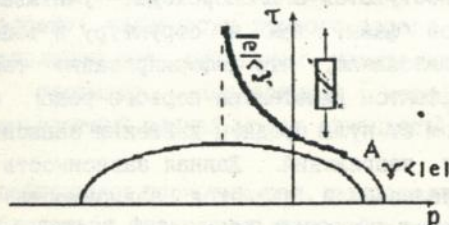


Рис. 8.

Кривая потери устойчивости пористого материала при пропорциональных нагружениях.

Приведенные результаты, по-видимому, могут быть отнесены не только к пористым материалам с "порошковым" генезисом, но также и к обычным металлам на стадии деформирования, предшествующей вязкому разрушению, когда имеет место заметное порообразование. Таким путем удастся объяснить регулярно наблюдаемое в опытах отклонение угла δ от $\Pi/4$.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Законы, определяющие поведение порошков и пористых тел при их пластической деформации, допускают две эквивалентные формулировки: среднее давление и интенсивность касательных напряжений задаются как функции показателя деформированного состояния, удовлетворяющие уравнению (1), при этом среднее давление монотонно возрастающая и ограниченная функция этого параметра, а интенсивность касательных напряжений положительна, ограничена и имеет экстремум, когда скорость уплотнения равна нулю;

задается выпуклая гладкая функция среднего давления, интенсивности касательных напряжений и других параметров, характеризующих состояние уплотняемого материала, которой в плоскости первых двух переменных соответствует замкнутая кривая; вектор с компонентами - скорость изменения объема, скорость изменения формы ортогонален касательной к ней в каждой точке.

Предложенная в работе конструкция определяющих уравнений нелинейно-вязких и пластичных симметричных пористых материалов, базирующаяся на постулатах В. В. Скорохода, учитывает как механизм деформации твердой фазы, так и структуру и топологию порового пространства. Установлено, что деформирование таких материалов сопровождается эффектом дилатансии первого рода: скорость уплотнения при отличном от нуля среднем давлении зависит от интенсивности касательных напряжений. Данная зависимость тем существеннее, чем более нелинейной является зависимость напряжений от скоростей деформаций в твердой фазе.

Связь между плотностью и давлением при уплотнении порошков и пористых тел зависит от способа нагружения. Наибольшее давление, необходимое для достижения заданной пористости имеет место при осевом сжатии в жесткой матрице. Энергозатраты при уплотнении увеличиваются с уменьшением жесткости деформированного состояния:

наибольшими они являются при свободной осадке, наименьшими - при изостатическом прессовании. Схема Ю. Г. Дорофеева обеспечивает наименьшие энергозатраты при получении изделия с заданными размерами и плотностью из данной заготовки. Деформационное упрочнение пористых тел неинвариантно относительно схемы нагружения: при жестких схемах деформации соответствующая кривая выпукла вниз, при свободной осадке, сдвиге и растяжении - вверх.

Осевое прессование втулок в жестких матрицах с применением подвижных пресс-элементов приводит к наиболее равномерному распределению плотности и наименьшему давлению уплотнения при двустороннем прессовании и встречном перемещении матрицы и стержня. При уплотнении высоких изделий процесс прессования сопровождается распространением волн уплотнения и затвердевания. Верхний предел формуемости определяется коэффициентом внешнего трения и размерами образца. При радиальном уплотнении втулок наибольшая плотность достигается на их внутренней поверхности.

Разработан метод проникаемых элементов, позволяющий определять распределение плотности при осевом прессовании в жестких матрицах изделий сложной формы на прессовом оборудовании, допускающем автономное одновременное движение нескольких пресс-элементов. Применение метода позволяет не только корректировать схему прессования, но также и разбиение изделия на части таким образом, что перепад плотности оказывается минимальным.

Предложена теория необратимого деформирования пористых материалов, учитывающая возможность образования новых пор в процессе деформирования, а также несимметричную механическую реакцию материала на изменение направления деформации на противоположное. Модель учитывает эффект дилатансии второго рода: разрыхление при нулевом среднем давлении под действием касательных напряжений. Модель содержит параметр, аналогичный мере несовершенств М. Ю. Бальшина, и как частный случай может описывать поведение сыпучих сред.

При схемах деформации пористых тел, сопровождающихся разрыхлением, может наблюдаться физическая неустойчивость, выражающаяся в том, что рост напряжений за счет наклепа твердой фазы (физический фактор) компенсируется его уменьшением за счет разрыхления (геометрический фактор). Указанный эффект является одним из необходимых условий локализации деформаций. Полосы сдвига (феномен Людерса-Чернова) возникают при плоской пластической деформации,

если достигается момент потери устойчивости, а скорость изменения объема по абсолютной величине меньше скорости изменения формы. Ориентация полосы относительно главных направлений тензора напряжений в отличие от беспористого материала неинвариантна относительно схемы деформированного состояния. Разрушение материала, когда скорость разрыхления превышает по абсолютной величине скорость изменения формы, контролируется механизмом отличным от сдвигового.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

освещены в 75-ти научных публикациях автора, в том числе

1. Мартынова И. Ф., Штерн М. Б. Уравнение пластичности пористых тел, учитывающее истинные деформации материала основы. - Порошковая металлургия, 1978, N1, с. 23-29.

2. Скороход В. В., Штерн М. Б. Технология процессов формования и спекания порошковых материалов / препринт общества "Знание" УССР. Киев, 1985, 19 с.

3. Феноменологические теории прессования порошков/ Штерн М. Б., Сердюк Г. Г., Максименко Л. А. и др. - Киев: Наук. думка, 1982. - 140 с.

4. Юрченко Е. А., Штерн М. Б. Математические основы и компьютерная имитация процессов получения изделий из порошков. Издание Института электродинамики АН Украины (препринт), 1992, 37 с.

5. Друянов Б. А., Радомысельский И. Д., Штерн М. Б. Математическое моделирование процессов обработки давлением металлических порошков и пористых тел. - Порошковая металлургия, 1981, N3. с. 6-12.

6. Штерн М. Б. Определяющие уравнения для уплотняемых пластичных пористых тел. - Порошковая металлургия, 1981, N 4. с. 17-23.

7. Радомысельский И. Д., Печентковский Е. Л., Сердюк Г. Г., Штерн М. Б., Максименко Л. А. Распределение плотности и перемещение порошка при прессовании в закрытых пресс-формах. - Порошковая металлургия, 1982, N 1, с. 9-14.

8. Штерн М. Б. Процессы двухосной деформации пористых тел. - Порошковая металлургия, N2, с. 16-21.

9. Штерн М. Б. Особенности плоской деформации пористых материалов, 1982, N3, с. 9-21.

10. Скороход В. В., Мартынова И. Ф., Штерн М. Б. Уплотнение по-

ристых цилиндров в отсутствие ограничения пассивной деформации. - Порошковая металлургия, №9, 1979.

11, 12. Каташинский В. П., Штерн М. Б. Напряженно-деформированное состояние прокатываемого порошка в зоне уплотнения. - Порошковая металлургия, №11, 12, 1983.

13. Мартынова И. Ф., Штерн М. Б. Методы решения задач пластического деформирования пористых спеченных металлов. - Труды VII международного совещания по порошковой металлургии, ГДР, Дрезден, 1981.

14. Штерн М. Б., Радомысльский И. Д., Михайлова О. В. Теория обработки давлением порошковых материалов. - Кузнечно-штамповочное производство, №8, 1982, с. 17-21.

15. Штерн М. Б. К теории пластичности пористых тел и уплотняемых порошков. - В кн.: Реологические модели и процессы деформирования порошковых пористых композиционных материалов, К.: Науковая думка, 1985, с. 12-22.

16. Сердюк Г. Г., Штерн М. Б. Теория технологии оборудования для формования порошков в порошковой металлургии. - В кн.: Итоги науки и техники. Порошковая металлургия. т. 2, М. ВИНТИ, 1986.

17, 18. Штерн М. Б. Эквивалентные напряжения и деформации порошковых материалов. - Порошковая металлургия, №1, №2, 1987.

19. Скороход В. В., Штерн М. Б., Мартынова И. Ф. Теория нелинейно-вязкого и пластического поведения пористых тел. - Порошковая металлургия, 1987, №8, с. .

20. Штерн М. Б., Олевский Е. А. Расчеты процессов прессования и штамповки порошковых материалов методом пронизаемых элементов. - В кн.: Новые порошковые материалы и технологии в машиностроении, Киев, ИПМ АН УССР, 1988, с. 27-31.

21. Штерн М. Б., Сердюк Г. Г., Олевский Е. А., Михайлов О. В. Определение поля плотностей при прессовании изделий сложной формы методом пронизаемых элементов. - Порошковая металлургия, 1989, №3, с. 15-21.

22. Штерн М. Б., Сердюк Г. Г., Олевский Е. А., Михайлов О. В. Использование разъемных пуансонов при получении порошков изделий ступенчатой формы. - Порошковая металлургия, 1989, №4, с. 16-31.

23. V. V. Skorochood, E. A. Olevsky, M. B. Shtern Continuum theory for sintering of the porous bodies: model and application. - Science of Sintering vol. 23, №2, 1991, pp. 79-91.

24, 25. Штерн М. Б. Модель процессов деформирования сжимаемых

материалов с учетом порообразования. - Порошковая металлургия, 1989, №5, 6.

26. Штерн М. Б. Развитие теории прессования и пластического деформирования порошковых материалов. - Порошковая металлургия, 1992, №9.

Подп. в печ. 25.01.93. Формат 60x84/16. Бум. офс.
Печ. офс. Усл. печ. л. 1,39. Усл.кр.-отт. 1,6.
Уч.-изд.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 68.

Институт проблем материаловедения
им. И.Н.Францевича АН УССР.
252680 Киев 680, ГСП, ул.Кржижановского,3.

Участок оперативной полиграфии
Института проблем материаловедения
им. И.Н.Францевича АН УССР.
252680 Киев 680, ГСП, ул.Кржижановского,3.

469867

AB 26.495

AB 26.495