

На правах рукописи

Александров Александр Эдмундович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ ПОРОШКОВЫХ И ПОРИСТЫХ
МАТЕРИАЛОВ

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2009

Работа выполнена на кафедре «Пластическая обработка металлов» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Рыбин Юрий Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Мертенс Карл Карлович

кандидат технических наук,
доцент
Воскресенский Адольф Михайлович

Ведущая организация: ФГУП «ЦНИИ материалов»
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «_19_» марта 2009 г. в 18 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.03 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, химический корпус, ауд.51.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан февраля 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



С.Ю.Кондратьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Научно-технический прогресс диктует появление новых способов получения и обработки материалов с заданными или принципиально новыми свойствами. К новым материалам можно отнести пористые, порошковые материалы, композиты. Изделия из таких материалов применяются в теплоэнергетике, авиационной, электротехнической и химической промышленности, специальном машиностроении. Перспективной является технология переработки отходов дорогостоящих металлов и сплавов путем их превращения в порошок и последующей обработки давлением.

Стадией, предшествующей разработке новых технологических процессов и конструкций, как правило, является математическое моделирование. На предпроектной стадии могут быть сопоставлены различные инженерные варианты решения технической или технологической проблемы, исключены заведомо неудачные или неприемлемые и выбран если не оптимальный вариант, то лучший из числа рассмотренных.

К настоящему времени накоплен многолетний опыт проектирования типовых процессов обработки металлов давлением, обобщенный в справочниках и представленный в виде технологических рекомендаций и эмпирических формул для расчета требуемых параметров прессования, прокатки, волочения. Для математического моделирования процессов нагружения и обработки материалов созданы крупные универсальные компьютерные программы, снабженные базами данных о свойствах материалов.

Обработка давлением порошковых материалов не прошла той же истории развития, которую прошла теория обработки литых материалов. Здесь нет накопленного и обобщенного опыта работы, нет сложившейся общепризнанной теории обработки давлением. Если при горячей объемной штамповке литых материалов необходимо предсказать заполнение штампа, руководствуясь представлением о сохранении объема, то при обработке давлением уплотняемых материалов необходимо рассчитать достигаемую плотность. Поведение уплотняемых материалов при обработке давлением нельзя описать в тех же терминах и с использованием тех же механических характеристик, которые привычны для компактных материалов. В некоторых условиях нагружения порошковые материалы подчиняются законам теории грунтов, в других условиях ведут себя как металлы. Таким образом, математическое моделирование процессов прессования, прокатки, экструзии порошковых и пористых материалов выдвигает задачу изучения их механических свойств и создания математического аппарата и компьютерных программ для решения задач обработки давлением. Их использование для предварительного анализа процессов деформирования уплотняемых материалов при обработке давлением поставит технологическое проектирование на тот же уровень, что и проектирование технологических процессов обработки компактных материалов.

Цель работы. Изучение закономерностей течения и уплотнения порошковых и пористых материалов на основе математического моделирования процессов обработки давлением.

Для выполнения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- опираясь на результаты численных и натурных экспериментов выяснить вид поверхностей текучести пористых и порошковых материалов, дать их математическое описание и сформулировать определяющие уравнения;
- провести доработки конечно-элементной постановки задачи теории пластического течения с включением параметров, характеризующих уплотняемые среды;
- выполнить численные эксперименты, обеспечивающие расчет механических характеристик пористого материала в зависимости от пористости и свойств компактного материала;
- реализовать возможности математического моделирования на примерах разработки технологического процесса уплотнения пористого материала Р6М5 в стальной оболочке с выбором рационального технологического решения, выполнения расчета параметров прессования заготовки варистора из оксидно-цинковой керамики в промышленных условиях.

Научная новизна работы.

1. Усовершенствована методика математического моделирования пластического течения при обработке металлов давлением в направлении учета влияния гидростатического напряжения на необратимое (неупругое) изменение объема, что открывает возможность анализа процессов уплотнения пористых и порошковых материалов.
2. Разработана методика численного эксперимента для определения механических свойств пористых материалов. Результаты численного эксперимента подтверждены измерениями. Численным экспериментом подтверждена адекватность эллиптического условия пластичности пористых материалов.
3. Для описания поведения порошковых материалов при обработке давлением предложено уравнение кривой текучести в виде параболы третьей степени, учитывающей изменение положения предела уплотнения по мере уплотнения порошка. Получены определяющие уравнения (ассоциированного закона пластического течения) для неквадратичной формы уравнения поверхности текучести. Показана адекватность использования параболического условия пластичности при математическом моделировании процесса прессования керамического порошка.

Практическая значимость работы.

1. Разработано и опробовано при решении исследовательских и производственных задач программное обеспечение, позволяющее решать широкий класс задач обработки давлением уплотняемых материалов.
2. Систематизированы сведения о механических характеристиках исследованных ранее металлических порошковых материалов. Получены экспериментальные данные о механических свойствах малопластичного

материала - оксидноцинковой керамики; построены уравнения предельного состояния в исследованном диапазоне плотностей; выполнены расчеты распределения плотности при промышленном освоении технологического процесса прессования заготовок варистора; даны рекомендации к выбору усилия прессы для получения заготовки максимальной плотности без разрушения.

3. Проведены систематические расчеты механических характеристик пористых материалов. На базе разработанных моделей процессов и рассчитанных механических свойств пористого материала выполнены предпроектные исследования уплотнения порошкового материала Р6М5 в оболочке при осадке и экструзии, позволившие дать конкретные рекомендации для проектирования заготовки и оснастки.

Разработанное программное обеспечение используется в учебном процессе в СПбГПУ при выполнении работ по курсу теории обработки давлением уплотняемых материалов.

Методы исследования.

1. Построение математической модели уплотнения порошковых и пористых материалов с использованием теории пластического течения и численной реализацией методом конечных элементов; построение определяющих уравнений – на базе ассоциированного закона пластического течения.

2. Экспериментальное исследование с применением современных средств измерений усилий при прессовании и плотности материалов в лабораторных и промышленных условиях.

3. Компьютерная обработка результатов эксперимента.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математические модели течения и уплотнения пористых и порошковых материалов;
2. Результаты расчета зависимостей механических характеристик пористого материала от относительной плотности и предела текучести матричного материала;
3. Рекомендации по технологии экструзии порошка быстрорежущей стали и прессования оксидно-цинковой керамики.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии обработки материалов давлением» (Минск, 2004); на 6-ой и 7-ой международных научно-технических конференциях «Современные металлические материалы и технологии и их использование в технике» (Санкт-Петербург, 2004, 2006); на международной научно-технической конференции «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов» (Санкт-Петербург, 2005); представлены на VII международной научной конференции «Nove technologie I osiagnięcia w metalurgii I inżynierii materiałowej» (Częstochowa, Польша, 2006).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 9 публикациях, список которых приведен в конце автореферата.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Общий объем 165 страниц, включая 87 рисунков, 4 таблицы. Список литературы включает 91 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, ее научная новизна и практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту.

В главе 1 дана общая характеристика существующих методов и подходов к моделированию процессов обработки давлением, показана возрастающая роль порошковых, пористых, композиционных материалов. Проведенный анализ научно-технической литературы выявил, что теория уплотнения порошковых материалов развивается в двух основных направлениях: исследование условий контактного взаимодействия и деформаций отдельных частиц (исходя из представления о дискретном характере среды) и построение математической теории пластичности на базе континуального представления среды. Первое из этих направлений позволяет описать структурные изменения материала в процессе уплотнения; второе - предполагает возможность анализа напряженно-деформированного состояния материала в заданных условиях технологического или эксплуатационного нагружения на базе механики сплошной среды.

Поскольку в данной работе ставится задача моделирования технологических процессов обработки давлением уплотняемых материалов, предполагающая возможность решения поисковых задач, совершенствования технологических процессов, материал рассматривается как континуум, что позволяет применить математический аппарат анализа непрерывных функций. При этом приходится отвлечься от представления о дискретном характере среды и учета контактных взаимодействий частиц.

Чтобы применить известный математический аппарат теории пластического течения к анализу процессов обработки давлением уплотняемых материалов, необходимо решить две основные проблемы: выбора и вычислительной реализации условия пластичности, соответствующего поставленной технологической задаче; получения сведений о механических свойствах материала, которые необходимы для описания принятого условия пластичности.

В главе 2 рассмотрена математическая постановка задачи неизотермического упруго-пластического течения, ориентированная на решение задач обработки металлов давлением. Для компактных материалов связь между гидростатическим давлением и объемной деформацией, имеющей упругий характер, устанавливается модулем объемной деформации (константой). Выражение для приращения пластических деформаций определяется на основании ассоциированного закона течения, из которого следует пропорциональность девиаторов напряжений и приращения пластических деформаций. Для компонент девиаторов имеем

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda S_{ij}$$

Здесь $d\lambda = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_i^p}{\sigma_i}$ - множитель Лагранжа.

Для компактных материалов задача пластического течения – физически нелинейная – раскрывается в ходе итерационного процесса. Неопределенный множитель Лагранжа, имеющий физический смысл коэффициента вязкости, подбирается так, чтобы удовлетворить условие пластичности.

В отличие от компактных материалов, пористые и порошковые материалы деформируются под действием гидростатического давления с необратимым изменением объема, увеличивая плотность за счет уменьшения объема пор.

Условие пластичности в форме Губера-Мизеса, используемое в теории течения компактных материалов, не отражает сути процесса пластического деформирования уплотняемого материала. Помимо неопределенного коэффициента, связывающего компоненты девиаторов напряжений и скоростей деформаций, в постановке задачи для уплотняемых материалов фигурирует еще один неопределенный коэффициент - связи шаровых компонент тензоров напряжений и скоростей деформаций.

Скорость пластической деформации может быть выражена из уравнения ассоциированного закона течения при выбранном условии пластичности. Рассмотрены возможности получения этих выражений для трех поверхностей нагружения: эллипсоид вращения, параболоид вращения и поверхность вращения лемнискаты.

Для кривой текущей в виде эллипса возможность раскрытия физической нелинейности показана Б.А. Друяновым. Аналогичная возможность для кривых текущей в виде лемнискаты и параболы третьей степени показана в главе 2. Чтобы сохранить линейность связей компонент напряженного и деформированного состояний, принятую в теории пластического течения, при использовании кривых текущей выше второго порядка, коэффициенты пропорциональности приходится поставить в зависимость не только от параметров деформированного состояния, но и напряженного.

Конечно-элементная формулировка задачи теории течения базируется на одном из наиболее известных вариационных принципов механики - начале виртуальных скоростей. В соответствии с основными положениями теории пластического течения напряжение можно представить как сумму девиаторной и шаровой части тензора

$$\sigma_{ij} = S_{ij} + \delta_{ij} \sigma_0$$

Уравнением виртуальных мощностей означает равенство мощностей внутренних сил (напряжений) в объеме тела V на произвольном (виртуальном) поле скоростей и мощности внешних сил на том же поле скоростей.

$$\int_V S_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dV + \int_V \sigma_0 \delta \dot{\varepsilon}_0 dV = \int_S p_i \delta U_i dS$$

Здесь: S_{ij} - компоненты девиатора напряжений,

$\dot{\varepsilon}_{ij}$ - компоненты тензора скоростей деформации,

p_i - компоненты внешних сил на поверхности S .

Левая часть равенства включает компоненты мощностей изменения формы и изменения объема. Мощность, расходуемая на изменение объема, представляет собой мощность упругих деформаций (для компактных материалов). Для уплотняемых материалов сюда входит мощность, расходуемая на необратимые деформации.

В соответствии с концепцией метода конечных элементов разрешающая система уравнений представляет собой систему линейных алгебраических уравнений, три из которых имеют смысл уравнений равновесия в узловой точке, четвертое – условие постоянства (для компактных материалов) или изменения (для уплотняемых материалов) объема. Матрица жесткости для уплотняемых материалов отличается наличием в четвертом столбце вместо нулей (условие постоянства объема) компонент, учитывающих изменение объема.

Для блока матрицы $[K_{ij}]$, учитывающего жесткость в узле i , обусловленную влиянием на него узла j , получаем:

$$[K_{ij}] = \int_{V^r} \begin{vmatrix} \mu(2b_i b_j + c_i c_j + d_i d_j), & \mu b_j c_i, & \mu b_j d_i, & b_i N_j \theta \\ \mu b_i c_j, & \mu(2c_i c_j + b_i b_j + d_i d_j), & \mu c_j d_i, & c_i N_j \theta \\ \mu b_i d_j, & \mu c_i d_j, & \mu(2d_i d_j + b_i b_j + c_i c_j), & d_i N_j \theta \\ b_j N_i, & c_j N_i, & d_j N_i, & -\frac{N_i N_j}{\bar{K}} \end{vmatrix} dV^r$$

Здесь: μ - коэффициент вязкости (искомая переменная величина); N – функции формы конечного элемента; b, c, d – производные функций формы; \bar{K} - модуль объемной деформации (искомая переменная величина); $\theta = 1 - \frac{2\mu}{3\bar{K}}$.

Для уплотняемого материала матрица жесткости становится несимметричной.

В главе 3 описан алгоритм решения задачи упруго-пластического течения уплотняемых материалов. Изложены вычислительные аспекты сходимости при использовании в качестве кривых текучести эллипса, лемнискаты, параболы третьей степени. Сходимость итерационных процессов при использовании эллипса и лемнискаты с фиксированным положением предела уплотнения (границы зон уплотнения и разрыхления) устойчива. В случае параболы третьей степени сходимость во многом зависит от начального приближения.

В главе 4 рассматривается модель уплотнения пористого тела, оценивается адекватность использования эллипса в качестве кривой текучести, рассчитываются механические свойства пористого тела. Эти вопросы нашли отражение в работах многих исследователей: В.В. Скорохода, Р. Кристенсена, М.Б. Штерна, Б.А. Друянова, А.К. Григорьева, А.И. Рудского. Общим моментом в исследованиях механических характеристик пористых тел является постановка их в зависимость от свойств матричного материала и относительной плотности. Различие – в допущениях при аналитическом решении задач. Здесь ставится задача построения кривой текучести и расчета механических свойств во всем реальном диапазоне относительной плотности средствами численного эксперимента.

В основу положена идея представления пористого тела в виде полидисперсной среды с порами, успешно использованная А.К. Григорьевым и А.И. Рудским. В качестве элемента полидисперсной среды, способного заполнить пространство без зазоров, из 24 многогранников-параллелепипедов выбран куб со сферической порой в центре. Размер поры определяет пористость Π или относительную плотность ρ . На рис.1 показана аппроксимация 1/8 кубической ячейки с порой сеткой изопараметрических квадратичных конечных элементов в исследованном диапазоне варьирования пористости. Задавая по граням куба соответствующие нагрузки, на таком элементе удобно моделировать испытания на растяжение, одноосное сжатие, сжатие в закрытой матрице, гидростатическое сжатие, чистый сдвиг. Основное допущение – регулярное заполнение пространства однотипными элементарными ячейками.

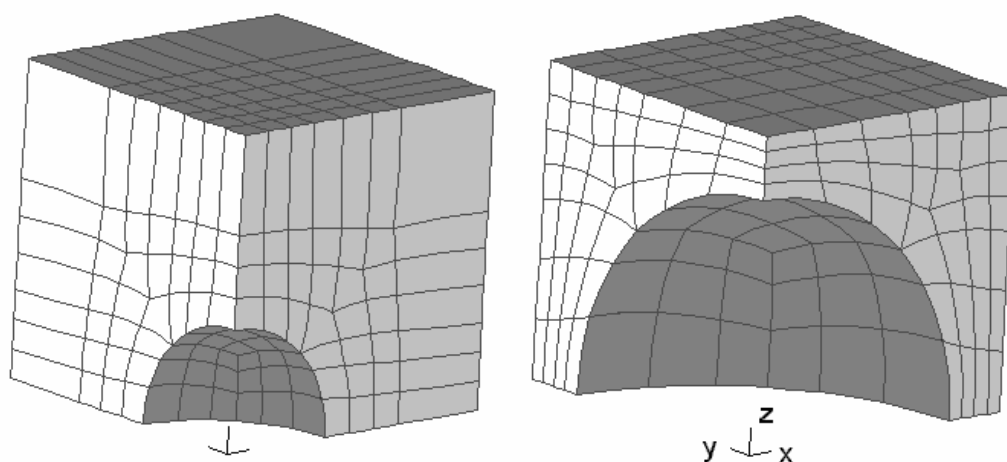


Рис.1 Конечно-элементные модели кубической ячейки, соответствующие относительной плотности $\rho=0,975$ и $\rho=0,732$.

Результаты нагружения элементарных кубических ячеек, представленные на рис.2, позволяют получить сведения о пределе текучести при заданном виде нагружения, построить по этим результатам кривую текучести в осях: первый инвариант тензора напряжений σ_0 (за положительное направление гидростатического напряжения условно принято сжимающее) – второй инвариант девиатора T (рис.3). Предел текучести компактного материала при проведении численного эксперимента принят $\sigma_s=200$ МПа.

Результаты расчета механических характеристик пористого материала в относительных единицах (отношение к пределу текучести компактного материала) приведены на рис.4 и 5. Там же указаны результаты расчета по формулам из книги Б.А. Друянова. Расхождения увеличиваются по мере увеличения относительной плотности. Это объясняется допущениями аналитического расчета. Экспериментами на растяжение образцов из пористых материалов на основе железа, меди, алюминия, никеля подтверждена правильность результатов численных экспериментов на модельных ячейках.

Наличие сведений о пределах текучести на сдвиг и гидростатическое сжатие пористого материала, приведенных на рис.4 и 5 в относительных единицах, позволяет рассчитать механические свойства конкретного пористого материала, если известны свойства компактного (матричного) материала.

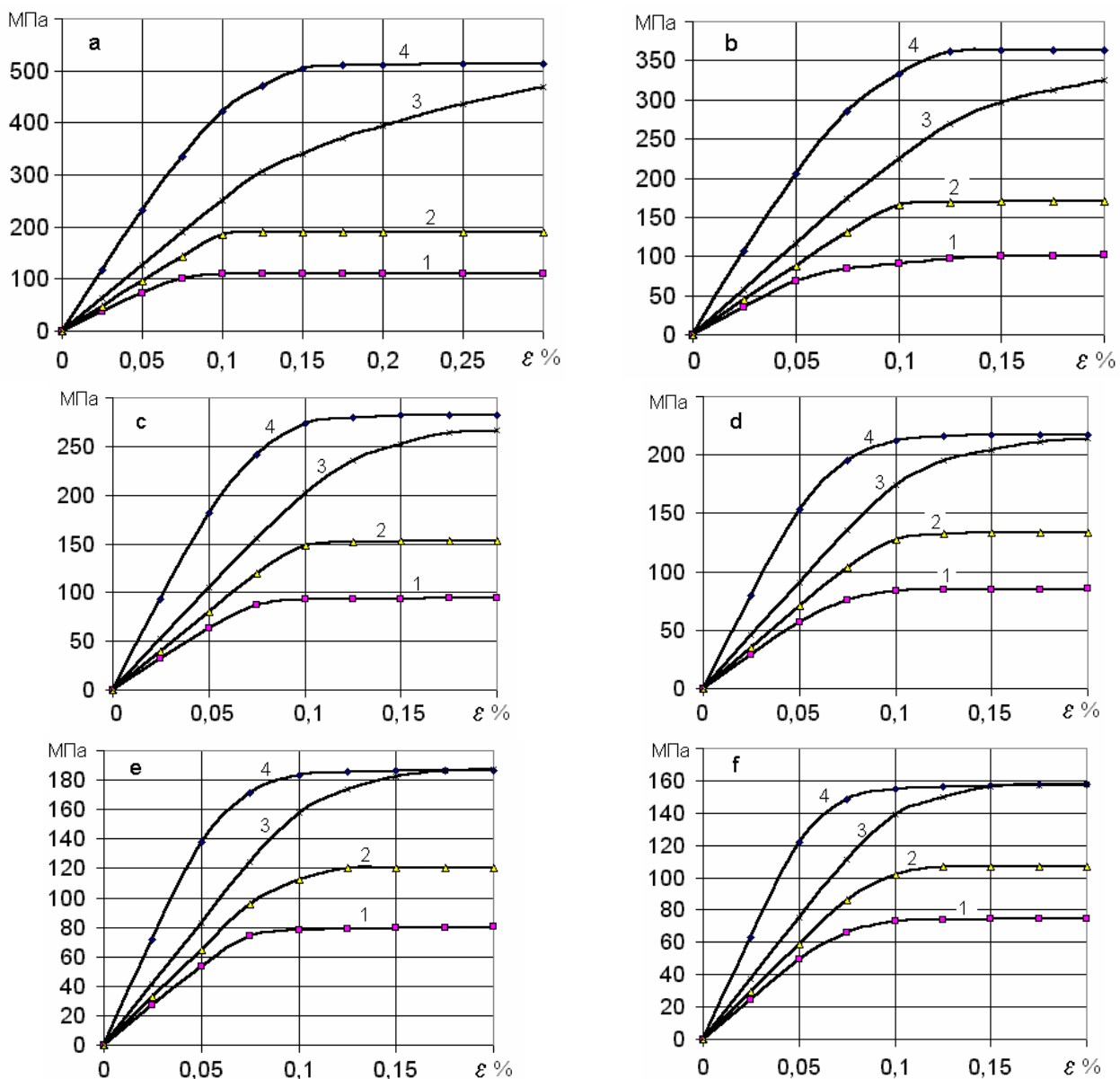


Рис.2 Нарастание внешнего давления с увеличением деформации ячейки с порой: а - $\rho=0,975$, б - $R\rho=0,935$, в - $\rho=0,887$, д - $\rho=0,82$, е - $\rho=0,78$, ф - $\rho=0,732$.
 1 - при чистом сдвиге; 2 - при одноосном сжатии; 3 - при сжатии в закрытой матрице; 4 - при гидростатическом сжатии

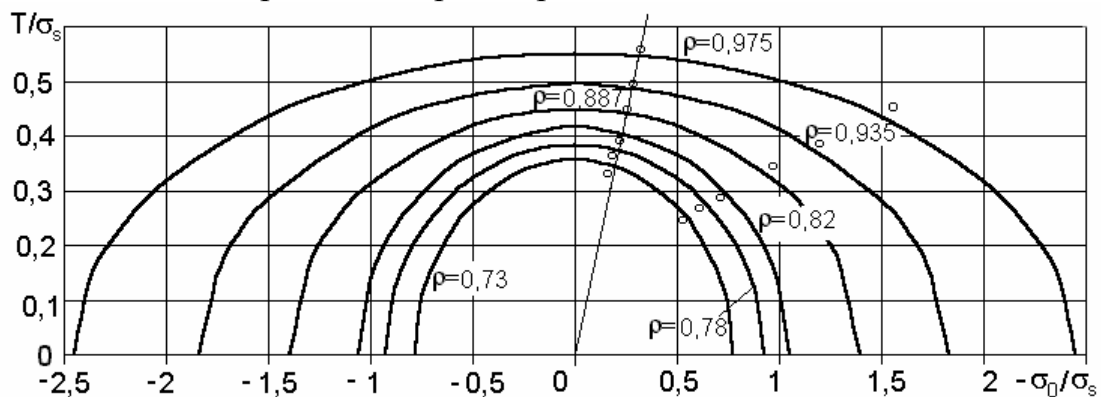


Рис.3 Кривые текучести для исследованного диапазона относительной плотности. Точками показаны результаты численного эксперимента на одноосное сжатие и прессование в закрытой матрице.

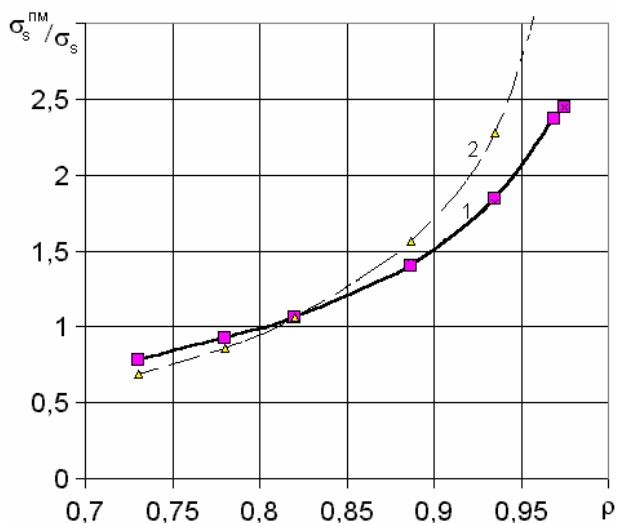


Рис.4. Зависимость предела текучести на гидростатическое сжатие от относительной плотности:
 1 – численный эксперимент
 2 – предел текучести по Б.А. Друянову

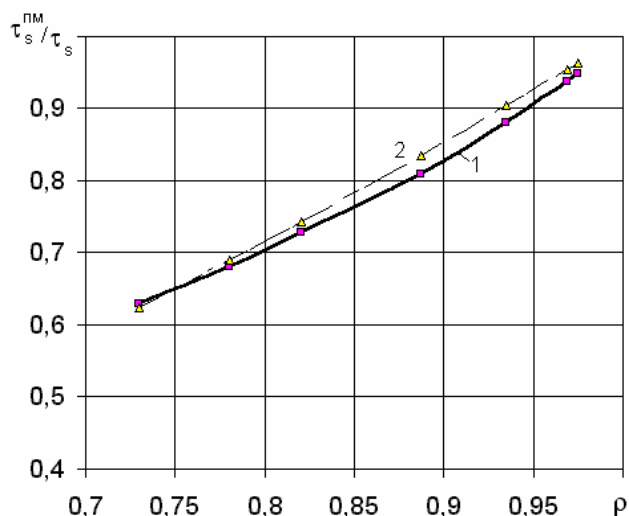


Рис.5 Зависимость предела текучести при чистом сдвиге от относительной плотности:
 1 – численный эксперимент
 2 – предел текучести по Б.А. Друянову

В рамках работы, связанной с утилизацией отходов, рассматривались некоторые технологические варианты уплотнения порошка быстрорежущей стали Р6М5. Поскольку обработка давлением предполагается при температуре $T=1050-1100^\circ$, порошок быстрорежущей стали можно интерпретировать как пористый материал и задать его механические свойства в функции относительной плотности при известном пределе текучести компактного материала $\sigma_s=70\text{МПа}$ (рис.6).

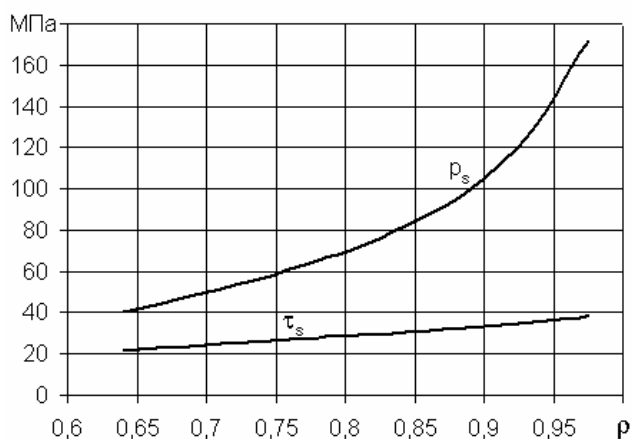


Рис.6 Зависимости пределов текучести на гидростатическое сжатие и чистый сдвиг пористого материала Р6М5 ($\sigma_s=70\text{МПа}$)

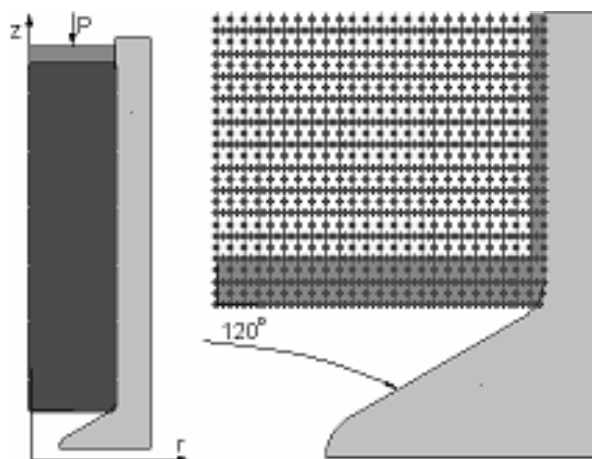


Рис.7 Сетка конечных элементов для моделирования процесса экструзии пористого материала Р6М5 в стальной капсуле

Наиболее простым технологическим вариантом представляется продольная осадка нагретого порошкового материала, засыпанного в капсулу. Неясным оставался вопрос о возможности получения высокой плотности и средствах ее повышения. Варьировалась толщина оболочки ($t=3\text{ мм}$ и 6 мм) при постоянной толщине доннышек (4 мм). При исходной относительной плотности материала $\rho=0,64$ пористый материал мог быть уплотнен не более чем до $0,75-0,8$ при большой разнотности. На этом основании технологический вариант осадки был отвергнут.

Далее были проанализированы возможности экструзии порошка в оболочке через коническую матрицу с углом $\alpha=90^\circ$ и $\alpha=120^\circ$. Варьировалась толщина доннышка. Критериями качества были высокая плотность (порядка $\rho=0,95-0,99$) и минимальная обрезь.

Приемлемые результаты были получены при экструзии исходной заготовки диаметром $O146\text{ мм}$ и высотой $h=300\text{ мм}$. Толщина стенки оболочки в рассматриваемом варианте принята $t=3\text{ мм}$; толщина верхней крышки равна 5 мм . Толщина нижнего доннышка варьировалась: $t=5\text{ мм}$, $t=10\text{ мм}$, $t=15\text{ мм}$ и $t=20\text{ мм}$. Диаметр очка матрицы $O48\text{ мм}$. Угол конуса $\alpha=120^\circ$. Плотность, близкая к плотности компактного материала, достигалась независимо от толщины доннышка; минимальные отходы получались при толщине доннышка $t=10\text{ мм}$. При угле конуса $\alpha=90^\circ$ отходы выше.

Схема процесса и сетка конечных элементов (число узлов - 4489, число элементов - 1440) показаны на рис.7. Справа укрупнено показан фрагмент сетки; затемненные элементы относятся к материалу капсулы. В силу осевой симметрии сеткой конечных элементов аппроксимирована половина продольного сечения. На рис.8 показаны поля распределения плотности на разных стадиях экструзии в капсуле с толщиной доннышка $t=10\text{ мм}$.

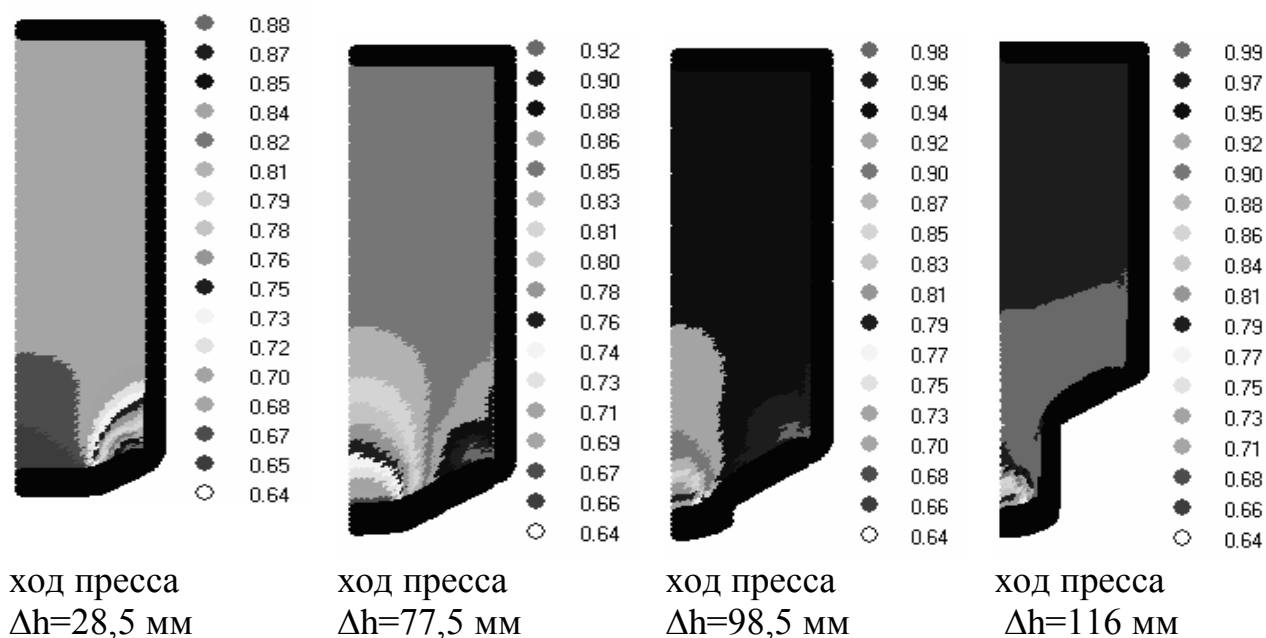


Рис.8 Распределение относительной плотности на стадиях экструзии.

Уплотнение порошкового материала достигается осадкой в контейнере и за счет уменьшения сечения в конической части матрицы. Чем меньше толщина доньшка, тем раньше материал заполнит конус матрицы. При очень тонком доньшке уплотнение происходит не за счет осадки в контейнере, а за счет уменьшения сечения.

Независимо от толщины доньшка можно выделить 3 характерные стадии процесса.

На начальной стадии усилие пресса целиком воспринимается стальной оболочкой. Это вызывает перемещение периферийной части доньшка по конической поверхности матрицы. Пористый материал на этой стадии является наполнителем стальной оболочки, препятствующим потере устойчивости тонкостенного цилиндра. Относительная плотность порошка на первой стадии не изменяется.

Вторая стадия процесса связана с постепенным уплотнением пористого материала. Силы трения препятствуют перемещению стальной оболочки по конической поверхности матрицы. При фиксированном положении доньшка относительно матрицы и перемещении пуансона происходит уплотнение порошка быстрорежущей стали. Часть усилия воспринимается уплотняющимся материалом и передается на центральную часть доньшка. Доньшко перестает быть вогнутым и постепенно становится выпуклым. Уплотнение начинается в зоне стыка цилиндрической оболочки и доньшка за счет радиального обжатия при перемещении оболочки по конической части матрицы. И наоборот, за счет осевой податливости доньшка в центральной части уплотнение минимально (рис.8). Чем толще доньшко, тем меньше область пониженной плотности в центральной части.

Для второй стадии характерно минимальное скольжение деформируемого материала по конической поверхности матрицы. Заполнение конуса достигается в основном за счет течения материала центральной части. Окончанием второй стадии процесса можно считать заполнение конической части матрицы.

Третья стадия процесса связана с истечением материала в очко матрицы и формированием прутка требуемого сечения (рис.8). Область пониженной плотности в осевой части уходит за доньшком в прутки и идет в обреш.

Глава 5 относится к уплотнению и течению порошковых материалов.

В отличие от пористого материала, механические характеристики которого удается вычислить в зависимости от предела текучести компактного материала и относительной плотности, для порошкового неспеченного материала никаких идей вычисления механических свойств не просматривается. И это не случайно.

Приведенные в предыдущей главе оценки механических характеристик пористого материала относились к идеализированному случаю неупрочняющегося материала, т.е. фактически к горячей деформации. Для порошковых материалов практическое значение, напротив, имеет холодная обработка; горячая деформация означает спекание и переход материала в разряд пористого. Таким образом, механические характеристики порошкового материала зависят от многих факторов, помимо относительной плотности и

свойств компактного материала. Поэтому нет иного пути определения механических свойств порошкового материала и построения кривых предельного состояния, кроме экспериментального.

Проведенные В.Н. Цеменко испытания семи порошковых материалов (на сдвиг, одноосное сжатие, сжатие в закрытой матрице, гидростатическое сжатие) привели к построению кривой текучести в виде параболы третьей степени. Точка максимума на этой кривой – предел уплотнения, граница областей уплотнения и разрыхления материала – смещается по мере уплотнения в сторону меньших значений гидростатического давления. Поэтому попытки описания кривой текучести порошкового материала уравнением второго порядка (смещенный эллипс) следует признать не отражающими реального поведения материала. Учет положения предела уплотнения имеет наиболее важное значение для малопластичных материалов, которые обрабатываются на стыке областей уплотнения и разрыхления. Описание предельного состояния уравнением выше второго порядка создает некоторые сложности при построении определяющих уравнений на основании ассоциированного закона пластического течения и ухудшает сходимость итерационных процессов при раскрытии физической нелинейности.

Разработанная методика математического моделирования процессов обработки давлением порошковых материалов на базе параболического (третьей степени) условия пластичности была применена для разработки технологического процесса прессования оксидоцинковой керамики, которая используется для производства полупроводниковых приборов - варисторов. Для придания пластических свойств в нее добавляется пластификатор, количество которого варьировалось в ограниченных пределах, поскольку существуют сложности его удаления из готовой заготовки.

Испытания образцов на одноосное сжатие, срез, сжатие в закрытой матрице, гидростатическое сжатие проводились на цилиндрических образцах из оксидоцинковой керамики Ø16,5 мм.. Область экспериментальных измерений охватывает интервал относительной плотности 0,566-0,7 при исходной относительной плотности $\rho=0,28-0,355$. Кривые текучести показаны на рис.9.

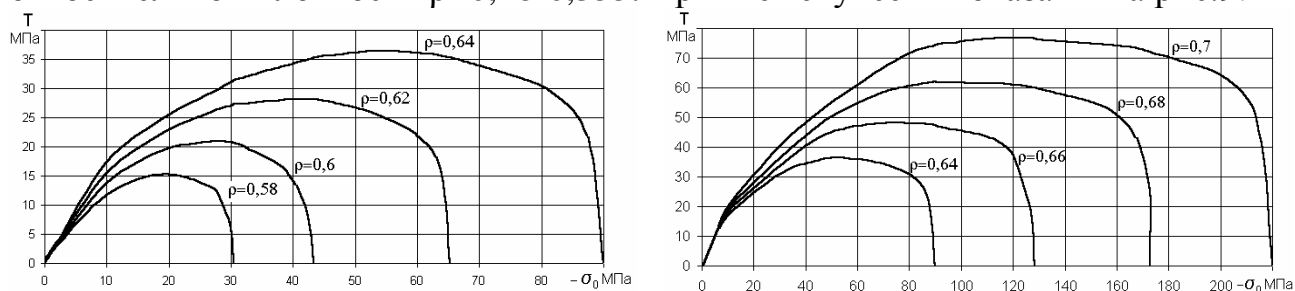


Рис.9 Кривые предельного состояния оксидоцинковой керамики

Зависимости механических характеристик от плотности керамического порошка приведены на рис.10:

ρ_s - предела текучести при гидростатическом сжатии (МПа),

τ_s - предела текучести при пластическом сдвиге (МПа),

c - предела уплотнения (МПа).

Маркеры на кривых (рис.10) относятся к экспериментальным точкам.

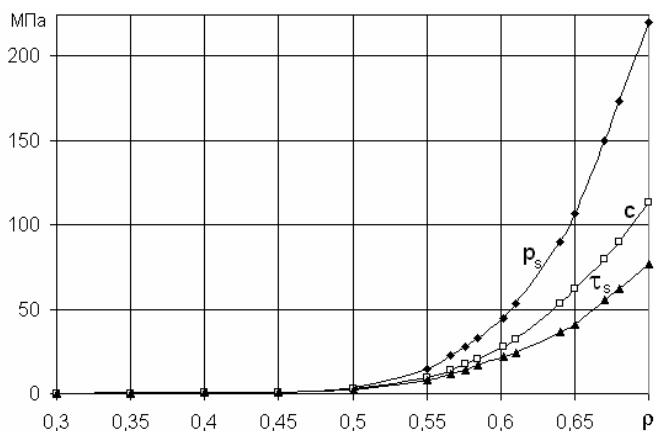


Рис.10 Зависимости механических характеристик оксидоцинковой керамики от относительной плотности

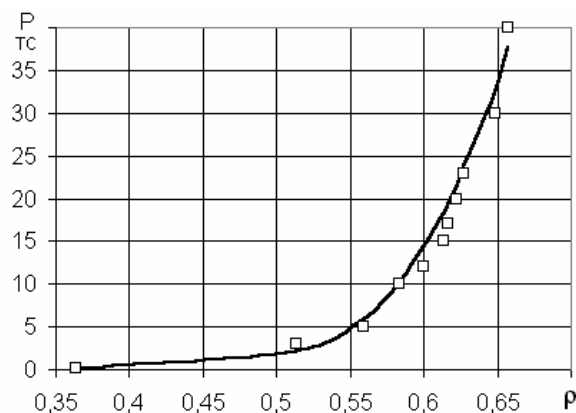


Рис. 11 Расчетная зависимость усилия прессы от относительной плотности при прессовании образцов О56 мм

Объектом исследования и изготовления в настоящей работе являлось изделие из оксидноцинковой керамики в форме диска О56 мм. Цель – достичь максимально возможной плотности, не допуская образования трещин (разрушения). Расчетная часть состояла в построении зависимости усилия прессы от плотности с использованием механических характеристик, показанных на рис.10. Превышение усилия ведет к разрушению заготовки. Эксперименты проводились на производственном участке изготовления электрофизической керамики и предусматривали измерение плотности при задаваемых значениях усилия прессы.

На рис.11 результаты расчета процесса прессования заготовки О56 мм сопоставлены с результатами измерений, проведенных на ЗАО «Завод энергозащитных устройств» (отмечены квадратиками). Можно говорить о достаточно точном совпадении результатов расчета и результатов измерений во всем диапазоне относительных плотностей. Это подтверждает обоснованность уравнения предельного состояния и надежность определения механических характеристик (рис.10).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработанная методика математического моделирования процессов обработки давлением позволила распространить теорию пластического течения, в основе которой лежат уравнения течения вязкой жидкости, на класс уплотняемых материалов (пористых и порошковых). При этом определяющие уравнения находятся из ассоциированного закона пластического течения.
2. На модельной ячейке в виде куба со сферической порой численными экспериментами, моделирующими чистый сдвиг, одноосное сжатие, сжатие в глухой матрице и гидростатическое сжатие, подтверждена адекватность эллиптического условия пластичности пористых материалов. Механические характеристики пористых материалов определяются расчетным путем – численным экспериментом - в зависимости от предела текучести компактного

материала и достигнутой плотности. Выявлено очень слабое влияние формы пор на механические характеристики пористого тела. Установлено совпадение результатов испытания образцов пористых материалов на основе железа, меди, алюминия, никеля с результатами численных экспериментов.

3. Эллиптическое условие пластичности и вытекающие из него определяющие уравнения применены для анализа процессов прессования в оболочке и экструзии в оболочке порошка быстрорежущей стали Р6М5 при температуре 1100°. Решение позволило оценить влияние толщин стенки, доньшка, угла конуса при экструзии в оболочке. При этом выявлены три стадии уплотнения при экструзии; показано формирование зон повышенной и пониженной плотности, размеры которых зависят от толщины доньшка оболочки. Область пониженной плотности сохраняется в готовом прутке и далее должна уйти в обречь.

4. Анализом большого объема экспериментальных данных испытаний порошковых материалов на основе железа, меди, алюминия установлено, что поведение неспеченных материалов может быть описано параболическим (третьей степени) условием пластичности. Аппроксимация кривой текучести параболой третьей степени позволяет учесть влияние положения предела уплотнения, который по мере уплотнения материала сдвигается в сторону меньших гидростатических давлений. При средних давлениях, меньших предела уплотнения, порошок разрыхляется, при давлениях выше предела уплотнения – уплотняется. Предел уплотнения не может быть найден формально экспериментальным путем. Он определяется из аппроксимации результатов экспериментов параболой третьей степени.

5. Проведенные испытания порошка оксидноцинковой керамики на срез, одноосное сжатие, сжатие в закрытой матрице, гидростатическое сжатие во всем реальном диапазоне плотностей, показали корректность описания кривой текучести параболой третьей степени; найденные механические характеристики порошка оксидноцинковой керамики позволили выполнить расчеты распределения плотности при промышленном освоении технологического процесса прессования заготовок варистора; даны рекомендации по обеспечению надлежащей плотности при отсутствии разрушения отпрессованной заготовки. Рекомендации реализованы на заводе энергозащитных устройств.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. Цеменко, В.Н., Уравнение предельного состояния порошковых металлических материалов / Цеменко В.Н., Рыбин Ю.И., Александров А.Э. // Прогрессивные технологии обработки материалов давлением. Материалы международной научно-технической конференции 18 - 22 мая 2004 г. – Минск: УП "Технопринт"- 2004.
2. Цеменко, В.Н., Моделирование процессов уплотнения порошковых металлических материалов / Цеменко В.Н., Рыбин Ю.И., Александров А.Э. // Современные металлические материалы, технологии и их использование в

технике . 6-я международная научно-техническая конференция.// Санкт-Петербург: Издательство СПбГПУ – 2004 – с.253-259.

3. Цеменко, В.Н., Математическая модель уплотнения порошковых металлических материалов / Цеменко В.Н., Рыбин Ю.И., Александров А.Э.// Металлообработка – 2004 - №6(24) - с.45-49.

4. Александров, А.Э., Модель уплотнения пористого тела Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов / Александров А.Э., Рыбин Ю.И. // Труды 5-ой международной научно-технической конференции. – СПб. – 2005 – с.111-114.

5. Математическая модель уплотнения оксидноцинковой керамики в процессе прессования / Александров А.Э. [и др.] // VII Miedzynarodowa konferencja naukowa. Nowe technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii materialowej. – Czestochowa - 2006 - с.287-298.

6. Исследование и моделирование уплотнения порошка оксидноцинковой керамики при прессовании/ Александров А.Э. [и др.] // Современные металлические материалы, технологии и их использование в технике . 7-я международная научно-техническая конференция. – Санкт-Петербург – 2006 – с.223-231.

7. Цеменко, В.Н., Математическая модель процессов уплотнения порошка оксидноцинковой керамики/ Цеменко В.Н., Рыбин Ю.И., Александров А.Э. // Научно-технические ведомости СПбГТУ - 2006 - 4(46) - с.75-79.

8. Разработка модели уплотнения оксидноцинковой керамики при прессовании /Александров А.Э. [и др.] // Металлообработка –№5-6(35-36) –2006. – с.53-58.

9. Рудской, А.И., Модель пористого материала и условие пластичности пористых тел / Рудской А.И., Рыбин Ю.И., Александров А.Э. // Научно-технические ведомости СПбГПУ - 2008 - № 4(63) - с.249-254.