

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕСПЕЧЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Г.Л. Петросян,¹ М.Г. Арзуманян¹, М.Б. Сафарян¹, Г.Р. Кесоян²

1. Национальный политехнический университет Армении

2. ООО "Мамлич-нк", Ереван, Армения

На основе анализа известных в литературе работ выявлены особенности методов исследования процессов пластического деформирования спеченных и неспеченных порошковых материалов. Уплотнение порошковых материалов рассматривается как процесс деформирования сжимаемых тел, пластические свойства которых в основном определяются величиной плотности пористой среды. На основании условия пластичности Мора-Кулона решена задача определения компонентов напряженного состояния при прессовании брикетов из неспеченного порошка в жесткой цилиндрической матрице. Предложены экспериментальные методы испытания неспеченных брикетов квадратного и круглого поперечных сечений.

Ключевые слова: спеченные и неспеченные порошковые материалы, уплотнение, плотность, условия пластичности Мора-Кулона, жесткая цилиндрическая матрица, напряженное состояние.

Введение. В различных сферах народного хозяйства большое применение получили детали из порошковых материалов. Технологический процесс их изготовления в основном состоит из двух частей: сначала производится холодное прессование порошков в специальных пресс-формах, при котором изменяется их пористость, происходит уплотнение материала, в результате чего получают неспеченные заготовки различных форм и размеров. Затем после спекания их подвергают повторной обработке давлением, получая изделия окончательных размеров и плотности. Таким образом, производятся высококачественные детали с низким расходом энергии и материалов.

Несмотря на определенное сходство процессов уплотнения спеченных [1-4] и неспеченных [5-7] порошковых заготовок, их механизмы пластической деформации и разрушения значительно отличаются. Эти исследования находятся на стадии развития и опираются на соответствующие теории пластичности, созданные в 70-х годах прошлого столетия.

Методы определения механических свойств спеченных порошковых материалов [4,8] и процессы уплотнения и формования заготовок из них [3, 8, 9] исследованы достаточно подробно. Что касается неспеченных порошковых материалов, то механизм их деформирования более сложен и исследован в меньшей степени, что подтверждает актуальность исследования.

Целью настоящей работы является анализ экспериментальных исследований особенностей пластического деформирования неспеченных порошковых материалов и определение компонентов напряженного состояния при прессовании брикетов из неспеченного порошка в жесткой цилиндрической матрице.

1. Особенности пластического деформирования неспеченных порошковых материалов. В [3] рассматривается понятие непрерывности в механике порошковых и пористых материалов. Определение силовых и кинематических параметров, характеризующих состояние сплошной среды, основывается на гипотезе о непрерывности этой среды, что дает возможность сформулировать определения для таких величин, как напряжение, деформация, скорость деформации и т.д. Использование упомянутых величин при описании порошковых и пористых материалов усложняется тем, что отсутствует единое понятие о том, что необходимо подразумевать, говоря о частичке порошка. Частичка порошка считается твердым телом с определенными свойствами. Множество этих частичек называется порошком. С точки зрения механики сплошной среды (МСС), нельзя отождествлять порошок со средой из частичек порошка. В действительности, каждая частичка порошка представляет некоторое пространство сплошной среды, для которой можно использовать, например, понятие напряжения. Так как в порошке эта частичка находится с соседними частичками в достаточно сложных взаимодействиях, поэтому распределение напряжений в этом пространстве не будет однородным.

Известно, что многие кинематические аспекты поведения порошкового материала не отличаются от обычных сплошных тел. Это подтверждается широко известными опытами с окрашенными порошками [3], проведенными в закрытых пресс-формах, указывающими на нарушение плоскостности поперечного сечения прессовки, при котором соблюдается целостность слоев порошка. В пользу идеи целесообразности принятия непрерывности свидетельствует распределение плотности как плавной функции в области, занимаемой этим порошком. Необходимо отметить, что решение о распределении плотности обычно связано с предварительным разделением определенных областей брикета, объемы которых малы по сравнению с объемом всего тела и одновременно превосходят размеры порошка или поры. Характеристики свойств этой области и образца целиком идентичны, поэтому данная область считается “представительской” [3]. Распределение образца на такие области показывает путь внедрения понятия непрерывности. При этом принимается гипотеза о том, что существует область для любой засыпки порошка и любого пористого материала, которая по своим свойствам идентична описанным телам. Размеры этой области значительно меньше объема засыпки порошка или размеров пористого образца и значительно превосходят размеры пор или отделенных частей порошка. Засыпка или образец могут быть представлены в виде объединения этих областей, наименьшая из которых называется представительным элементом. Граничные переходы и использование

дифференциальных процессов основаны на предположении, что соответствующие элементы пространства приближаются к представительным элементам. Важно отметить, что определение всех характеристик порошковых и пористых сред в результате применения какой-то модели непрерывности имеет смысл в тех объемах, которые не меньше объема представительного элемента.

В [9] проводится анализ различных тел, имеющих конструкционные недостатки (пористые тела, порошковые материалы, порошки). Отмечается, что МСС является надежной теоретической основой расчета технологических процессов обработки давлением, и поскольку МСС основывается на предположении, что изучаемые объекты расположены непрерывно в занимаемом ими объеме, то ее применение на микроуровне возможно при условии, если размеры микрообъема многократно превосходят молекулярно-кинетические размеры. Аналогично, использование МСС на макрообъеме основано на предположении, что рассматриваемое тело может быть разделено на элементарные макрообъемы, чьи характерные размеры, с одной стороны, многократно малы по сравнению с характерными размерами рассматриваемого тела, а с другой стороны - многократно превосходят характерные размеры конструкционного элемента. На фоне этих предположений те макрохарактеристики (плотность, напряжение и т.д.), которые получены при помощи методов МСС, будут точно совпадать с усредненными микрохарактеристиками по макрообъему.

В [5] проводится анализ данных исследований характера пластического разрушения порошковых материалов. Для получения убедительной информации о разрушении и деформации порошковых материалов были осуществлены многочисленные исследования процессов деформирования прессовок различной плотности в различных условиях. Путем изменения сжимающих напряжений в контактных площадках между частицами пористой среды были получены все разновидности разрушения, начиная от хрупкого до развитого пластического течения, т.е. до появления характерных условий для прессования. Показано, что в условиях хрупкого разрушения даже порошковые материалы, имеющие низкую связываемость в условиях хрупкого разрушения (одноосного сжатия), деформируются как единое тело, характер разрушения которого происходит по общим законам деформации сплошной среды. Наиболее полное представление о формировании поверхностей скольжения дают испытания пористых образцов на одноосное сжатие с приложением дополнительного бокового давления, которые осуществляются с помощью резиновых оболочек, обеспечивающих равномерное распределение давления и способствующих устранению процессов разрушения, протекающих между частицами на контактных площадках, вследствие чего имеет место повышение пластических свойств тела и его плотности. Последующее повышение величины бокового давления при одноосном сжатии образца позволяет до разрушения пористого тела получать значительно высокие степени пластической деформации ($\epsilon_1 > 20\%$). В [5] показано, что если

продолжать повышение бокового давления (25...30 МПа), то даже при осадке исследуемых брикетов на 30...40%, которые были прессованы из восстановленного железного порошка, не обнаружено следов разрушения (рис. 1). В рассматриваемом случае процесс развития пластического течения непрерывно сопровождается процессом его интенсивного уплотнения, т.е. происходит обычный процесс прессования порошка. Начальная плотность образца до испытаний составляла 65%, а после деформации - 76%. Экспериментальные исследования процессов осадки таких специфических материалов, как пористый вольфрам и карбид кремния, в условиях регулируемого бокового давления доказывают то предположение, что для широкого спектра уплотняемых материалов допустимо рассмотрение их в качестве сжимаемых пластически деформируемых тел.

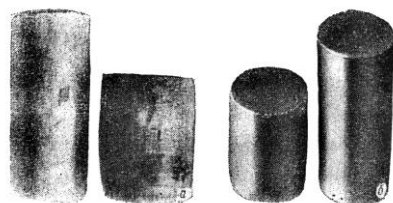


Рис. 1. Вид брикетов до и после осадки с боковым подпором:
а - ПЖ2М2; б – карбид кремния [5]

В [8] для спеченных порошковых материалов отмечается, что поскольку и литейные, и спеченные материалы в той или иной мере пористые, то механизмы их деформирования будут аналогичными, если размеры пор в спеченном материале по сравнению с размерами тела будут достаточно малы. Сказанное позволяет использовать известные методы исследования сплошных материалов для изучения вопросов пластического деформирования указанных пористых материалов.

Таким образом, приведенные в работах [3,5,8,9] данные подтверждают тот факт, что уплотнение порошковых материалов необходимо рассматривать как процесс деформирования сжимаемых тел, пластические свойства которых в основном определяются величиной плотности пористой среды. Это дает возможность использовать методы МСС для исследования процессов деформирования порошковых материалов.

Отметим, что моделирование процессов обработки давлением пористых металлических тел и пресс-материалов является одной из важных задач теории пластичности пористых тел.

2. Исследование напряженного состояния процесса прессования неспеченного брикета из порошка некоторой фиксированной плотности [5] в жесткой цилиндрической матрице. Напишем условие равновесия для элемента высотой dz , отделенного от цилиндрического брикета двумя поперечными сечениями (рис. 2):

$$d \cdot dp_z = 4f p_r dz, \quad (1)$$

где d - диаметр образца; f - коэффициент трения между матрицей и образцом; dp_z - давление, действующее по направлению оси образца; p_r - боковое давление.

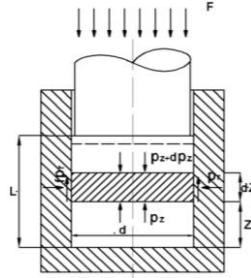


Рис. 2. Схема напряженного состояния при наличии трения о стенки матрицы (контейнера)

Рассмотрим случаи малых величин коэффициентов трения. При анализе напряженного состояния образца, пренебрегая касательными напряжениями и учитывая, что $p_z > p_r$, принимаем

$$\sigma_\theta = \sigma_r = \sigma_1 = \sigma_2 = -p_r, \quad \sigma_3 = \sigma_z = -p_z \quad (p_z > p_r).$$

Используем следующее условие пластичности Мора-Кулона [5,10,11]:

$$|\sigma_3 - \sigma_1| = (\sigma_3 + \sigma_1 + 2H) \sin \rho, \quad (2)$$

где $H = k \operatorname{ctg} \rho$; σ_1 и σ_3 - главные напряжения; ρ - угол внутреннего трения между частицами порошка; k - коэффициент сцепления между ними.

Подставляя величины главных напряжений в условие пластичности Мора-Кулона (2), для бокового давления получим следующую формулу:

$$p_r = \frac{p_z(1 + \sin \rho) - 2H \sin \rho}{(1 - \sin \rho)}. \quad (3)$$

Подставляя величину бокового давления (3) в уравнение равновесия (1) и учитывая, что $H = k \operatorname{ctg} \rho$, получим

$$dp_z = 4f \left(\frac{p_z(1 + \sin \rho) - 2H \sin \rho}{(1 - \sin \rho)} \right) dz \quad \text{или} \quad dp_z = \left(\frac{4fp_z(1 + \sin \rho)}{(1 - \sin \rho)} - \frac{8fk \cos \rho}{(1 - \sin \rho)} \right) dz. \quad (4)$$

Приняв обозначения $p_z/k = \bar{p}_z$, $dp_z/k = d\bar{p}_z$, $dz/d = d\bar{z}$, путем выбора $L/d = 1.2$ и решения уравнения (4) получим

$$\bar{p}_z = \frac{(a + b\bar{p}_o)e^{b(\bar{z}-1,2)} - a}{b}, \quad (5)$$

где $a = -8f \cos \rho / (1 - \sin \rho)$, $b = 4f(1 + \sin \rho) / (1 - \sin \rho)$.

Разделив уравнение (3) на k и подставив \bar{p}_z , получим следующее выражение для \bar{p}_r :

$$\bar{p}_r = \frac{p_r}{k} = \frac{(a + b\bar{p}_o)e^{b(\bar{z}-1,2)} - a}{4f}. \quad (6)$$

3. Анализ экспериментального исследования пластического деформирования неспеченных порошковых брикетов. Рассматриваются вопросы определения величин параметров k и ρ , находящихся в условиях пластичности неспеченных порошковых материалов Мора-Кулона и Друкера-Прагера [5,6,10,11].

В [7] проведено сравнение частиц порошкового материала с зерном сплошного металла и показаны их отличия:

1. Связь между зёрнами сплошного металла осуществляется по всей поверхности зёрен, а в случае порошков - только частью их поверхности.
2. Связь между зёрнами в сплошных телах жесткая, а между порошками - жестко-подвижная, что приводит к изменению величины значения контактной поверхности и объема порошкового материала.
3. Частицы порошка в порошковом материале не занимают весь объем (так как остальную часть занимают поры), поэтому механические свойства порошковых материалов могут составить лишь некоторую долю механических свойств сплошного материала.

В [5] приведены сведения о влиянии различных технологических факторов (размеры и формы частиц порошка, процентное содержание добавок и т.д.) на прочностные характеристики пористого брикета. С этой целью используется специальная гидравлическая установка для испытания на сдвиг (рис. 3). Неспеченный порошковый брикет 1 устанавливается в гидростановку 2 и подвергается сдвигу ножом 4 в условиях приложения к образцу некоторой сжимающей нагрузки пуансонами 3, действующими по осевому направлению образца. При этом давления p_2 и p_1 действуют одновременно.

Формированные в жесткой матрице цилиндрические брикеты (спрессованные до плотности 60, 70, 80%) из карбонильного железа ВЗ, восстановленные из железного порошка ПЖ2М и имеющие различные величины частичек порошка (0,020; 0,016 и 0,012мм), были подвергнуты сдвигу в плоскости, перпендикулярной к оси брикета, в условиях различного осевого давления.

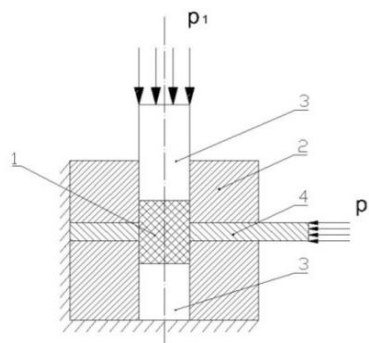


Рис. 3. Схема сдвиговой установки для определения свойств порошковых брикетов: 1 - порошковый брикет, 2 – гидравлическая установка, 3 - пуансон, 4 – нож

Исследования показали, что в исследуемой области изменение форм и размеров начального порошка наряду с уменьшением процентного содержания пор значительным образом влияет на величину отклонения значений k и ρ . Повышение плотности тела приводит к общему выравниванию коэффициента k относительно формы частиц порошка. Особое внимание было обращено на взаимное изменение коэффициентов k и ρ при прессовании пористых брикетов из порошка ПЖ2М2 с разными размерами частиц. Для всех рассмотренных плотностей изменение размеров частиц приводит к относительному уменьшению величины коэффициента k и значительному росту внутреннего угла трения ρ .

Основным недостатком этой гидравлической установки является ее сложность, связанная с одновременным действием давлений p_2 и p_1 , что ограничивает ее практическое применение.

Нами были разработаны следующие два варианта испытательных пресс-форм, обеспечивающих сдвиг неспеченных порошковых образцов, предварительно изготовленных двусторонним прессованием в виде брикетов определенных плотностей:

- находящийся под предварительным осевым давлением образец сдвигается по квадратному поперечному сечению;

- находящийся под предварительным боковым давлением порошковый брикет круглого поперечного сечения сдвигается по диаметральному сечению.

В первом случае целью экспериментов является отыскание такой совокупности нормальных и касательных давлений под действием сжимающих и сдвигающих сил, которая приводит к предельному состоянию материала образца. При этом, кроме записи сжимающих и сдвигающих усилий, регистрируются также величины перемещения пуансона и режущего ножа относительно корпуса пресс-формы.

На рис. 4 приведена принципиальная схема конструкции пресс-формы. Неспеченный порошковый образец 6 квадратного сечения прямоугольной призматической формы сначала прессуется в контейнере 3 пуансоном 2, при котором возникает напряжение σ_n , направленное вдоль оси брикета, а после поворота пресс-формы на 90° производится сдвиг перпендикулярно оси образца ножом 4, имеющим достаточно тонкое и острое лезвие. При этом возникает касательное напряжение τ_n . Полученные нормальные и касательные напряжения позволяют построить диаграмму Мора-Кулона [5] и определить механические характеристики порошкового брикета: ρ - угол внутреннего трения между частицами порошка, k - коэффициент сцепления между ними.

Рассматриваемая конструкция экспериментальной пресс-формы имеет следующие преимущества по сравнению с известными:

- рабочая камера контейнера имеет прямоугольное сечение, что обеспечивает плотную и устойчивую установку образца;

- использование в конструкции ножа прямой режущей кромки взамен круглой облегчает проведение исследовательских расчетных работ;
- экспериментальные исследования проводятся на более простом оборудовании.

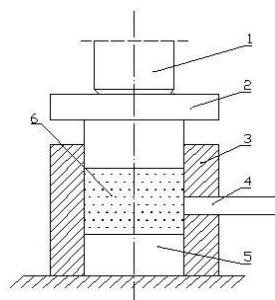


Рис. 4. Схема испытательной пресс-формы для резки образца перпендикулярно оси:
1 - прижим, 2 - пуансон, 3 - контейнер, 4 - нож, 5 - вставка, 6 - образец

Принципиальная схема пресс-формы для испытания сдвигом цилиндрического образца 7 по диаметральному сечению показана на рис. 5. Она состоит из контейнера 3, левых и правых прижимов и полуцилиндрических пуансонов 1 и 2, нижних левого и правого полуцилиндрических пуансонов 4, удерживающих предварительное осевое давление пружинного прижима 5, и пуансонодержателя 6.

Испытания проводятся двумя этапами:

1. Цилиндрический образец 7 сначала прессуется попарно между полуцилиндрическими пуансонами 2 и 4, после чего определяется боковое давление.

2. Находящийся под давлением образец 7 подвергается срезу левосторонним полуцилиндрическим пуансоном 2 при его движении вниз. При этом параллельно перемещается вниз также левосторонний пуансон 4.

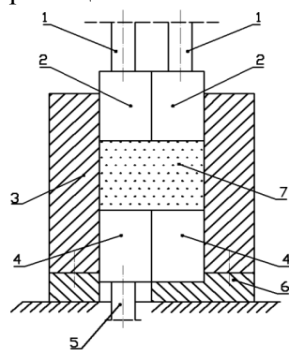


Рис. 5. Схема пресс-формы для испытания цилиндрического образца:
1 - прижим, 2 и 4 - верхний и нижний полуцилиндрические пуансоны,
3 - контейнер, 5 - пружинный прижим, 6 - пуансонодержатель, 7 - образец

Экспериментальная пресс-форма (рис. 5) осуществляет сдвиг образца по диаметральной плоскости, в которой возникает касательное напряжение τ_n . При этом боковое давление p_r , возникающее под действием предварительного осевого давления p_z , является нормальным напряжением σ_n в диаметральной плоскости. Таким образом, как и в первом случае, в сдвиговой плоскости имеем нормальные и касательные напряжения для определения механических характеристик порошкового брикета. Однако при сдвиге величина бокового давления может увеличиться, что приведет к уменьшению точности расчетов. Исследования в этом направлении продолжаются.

Заключение. На основании анализа известных в литературе работ выявляются особенности методов исследования процессов пластического деформирования спеченных и неспеченных порошковых материалов. Уплотнение порошковых материалов рассматривается как процесс деформирования сжимаемых тел, пластические свойства которых в основном определяются величиной плотности пористой среды. Это дает возможность использовать методы МСС для исследования процессов деформирования порошковых материалов.

Используя условия пластичности Мора-Кулона, решена задача определения компонентов напряженного состояния при прессовании образца из неспеченного порошка в жесткой цилиндрической матрице. При этом получаются аналитические формулы для определения давления прессования и бокового давления.

Предложены экспериментальные методы испытания неспеченных порошковых брикетов квадратного и круглого поперечных сечений, позволяющие определить их механические характеристики.

Литература

1. **Грин Р.Дж.** Теория пластичности пористых тел // В кн.: Механика (периодический сборник переводов иностранных статей). - М.: Мир, 1973.- N 4 (140). - С. 109-120.
2. **Петросян Г.Л.** О теории пластичности пористых тел // Известия вузов. Машиностроение. - 1977. - N 5. - С. 10-13.
3. Феноменологические теории прессования порошков / **М.Б. Штерн, Г.Г. Сердюк, Л.А. Максименко и др.** - Киев: Наукова думка, 1982. -140 с.
4. **Shima S., Oyane M.** Plasticity theory for porous metals // International Journal of Mechanical Science. - 1976. - Vol. 18. - P. 285 - 291.
5. **Перелман В.Е.** Формование порошковых материалов. - М.: Металлургия, 1979. - 232 с.
6. **Petrosyan G.L., Kraft T.** Application of plasticity theory for simulating compaction of metal powder. Report 2. Equations of plasticity theory of a constitutive model for metal powder // Proceedings of Engineering Academy of Armenia.- 2005.- Vol. 2, N 4.- P. 538-543.
7. **Бальшин М.Ю.** Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. - М.: Металлургия, 1972. - 535 с.

8. **Петросян Г.Л.** Пластическое деформирование порошковых материалов. - М.: Металлургия, 1988. - 153 с.
9. **Друянов Б.А.** Прикладная теория пластичности пористых тел. - М.: Машиностроение, 1989. – 168 с.
10. **Соколовский В.В.** Статика сыпучей среды. - М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1960.- 243 с.
11. **Петросян Г.Л., Арзуманян М.Г.** Об обобщенных условиях пластичности сплошных и металлических порошковых материалов // Материалы Межд. научн.-техн. конф. “Машиностроительные технологии и техника автоматизации – 2014”, 07-12 июля 2014.- Ереван, 2014.- С.108-113.

*Поступила в редакцию 17.11.2014.
Принята к опубликованию 02.04.2015.*

**ՉԵՌԱԿԱԼՎԱԾ ՓՈՇԵՆՅՈՒԹԵՐԻ ՊԼԱՍՏԻԿ ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՆԵՐԻ
ՇԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ**

Գ.Լ. Պետրոսյան, Մ.Գ. Արզումանյան, Մ.Բ. Սաֆարյան, Գ.Ռ. Քեսոյան

Բնագավառում հայտնի աշխատանքների վերլուծությամբ ցույց են տրվել եռակաված և չեռակաված փոշենյութերի պլաստիկ դեֆորմացիան գործընթացների հետազոտության մեթոդների առանձնահատկությունները: Փոշենյութերի խտացումը դիտարկվում է որպես սեղմվող մարմինների դեֆորմացիան գործընթաց, որոնց պլաստիկ հատկությունները հիմնականում որոշվում են ծակոտկեն միջավայրի խտության մեծությամբ: Մոր-Կուլոնի պլաստիկության պայմանի հիման վրա լուծված է կոշտ գլանական մամլամայրում չեռակաված փոշենյութի խտացման դեպքում լարվածային վիճակի բաղադրիչների որոշման խնդիրը: Առաջարկվել են փորձարարական մեթոդներ քառակուսի և կլոր լայնական հատույթով չեռակաված բրիկետների փորձարկման համար:

Առանցքային բանկը. եռակաված և չեռակաված փոշենյութեր, խտություն, Մոր-Կուլոնի պլաստիկության պայման, կոշտ գլանական մամլամայր, լարվածային վիճակ:

**PECULIARITIES OF INVESTIGATING THE PLASTIC DEFORMATION PROCESS
OF NON-SINTERED POWDER MATERIALS**

G.L. Petrosyan, M.G. Arzumanyan, M.B. Safaryan, G.R. Kesoyan

By analyzing the well known works in literature, the peculiarities of the investigation methods of the plastic deformation process of sintered and non-sintered powder materials are shown. Compaction of powder materials is considered as a deformation process of compressible bodies, whose plastic properties are generally characterized by the density value of the porous medium. Based on the Mohr-Coulomb plasticity condition, the problem of determining the stress state components is solved when the briquette from the non-sintered powder material is compacted in the hard cylindrical die. Experimental methods are proposed for testing non-sintered briquettes having quadratic and circular cross sections.

Keywords: sintered and non-sintered powder materials, density, Mohr-Coulomb plasticity condition, hard cylindrical die, stress state.