

УДК 621.762

О.А.Розенберг¹, О.В.Михайлов², М.Б.Штерн²¹Институт сверхтвердых материалов НАН Украины,²Институт проблем материаловедения НАН Украины

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ ПОРИСТЫХ ВТУЛОК МЕТОДОМ МНОГОКРАТНОГО ПРОТЯГИВАНИЯ

Исследован процесс упрочнения пористых втулок методом многократного протягивания по внутреннему диаметру. Особенностью процесса является применение промежуточной деформируемой прокладки из компактного металла, повышающей гидростатическую составляющую напряженного состояния и препятствующей разрушению изделия. Установлен локальный характер деформации и перемещение области деформации по высоте в процессе протягивания. С увеличением количества проходов происходит рост зон уплотнения и упрочнения в направлении увеличения радиуса. Периодическая смена направления протягивания позволяет получить более равномерное по высоте распределение свойств изделий.

Введение. Технологическая операция раздачи кольцеобразных изделий по внутреннему диаметру часто применяется при обработке металлов давлением [1] и при деформировании порошковых деталей [2]. В порошковой металлургии эта операция используется для калибровки внутренней поверхности втулок, предварительно полученных методами прессования порошков в жесткой матрице или радиального уплотнения. Указанные методы уплотнения не позволяют обеспечивать точные размеры получаемых прессовок (из-за упругого последействия). Кроме того, изменение размеров порошковых втулок происходит при последующем спекании. В связи с этим возникает необходимость использования деформирующего протягивания как калибрующей операции.

Операция протягивания может применяться также в качестве самостоятельного метода уплотнения, который отличается от широко применяемых методов прессования. Следует отметить, что в отличие от деформирования компактных металлов, порошковые втулки могут изменять свой объем, поэтому их обработка возможна при применении схем уплотнения, характеризующихся существенным ограничением кинематики течения. Например, порошковые втулки можно деформировать по внутреннему диаметру, не изменяя при этом высоту изделия [3].

Обработка протягиванием часто применяется для поверхностного упрочнения кольцеобразных изделий. В ИСМ под руководством проф. О.А. Розенберга разработаны специальные методы такой поверхностной обработки [4]. Применение указанных технологий позволяет совмещать уплотнение порошкового материала с поверхностной обработкой изделия по внутреннему диаметру. При этом операция протягивания осуществляется многократно с постепенным увеличением рабочего диаметра протягивающего инструмента. Такое многократное поверхностное упрочнение позволяет получить ультрамелкозернистую структуру материала (УМЗ) [5], что, в свою очередь, обеспечивает достижение более высоких прочностных характеристик получаемых изделий.

Схема деформирования. Целью технологической операции, рассматриваемой ниже, является поверхностное упрочнение втулки, изображенной на рис. 1, по внутреннему диаметру.



Рис. 1. Втулка, полученная из пористого материала

Операция раздачи по внутреннему диаметру может применяться как по отношению к пористой заготовке, так и непосредственно к порошку. Поэтому схема деформирования предполагает наличие промежуточного деформируемого цилиндрического контейнера, внешняя поверхность которого соприкасается с порошковой заготовкой, а внутренняя воспринимает воздействие протягивающего инструмента (рис.2).

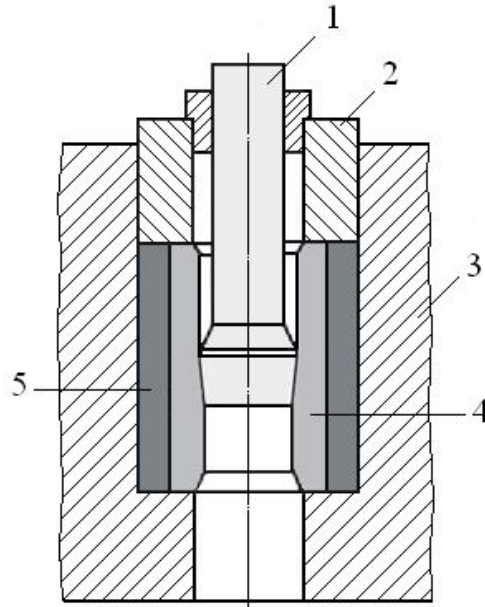


Рис. 2. Схема протягивания:

1 – оправка с деформирующим элементом; 2 - ограничитель; 3 - матрица; 4 - втулка; 5 – порошковая заготовка

Анализ выполнен при условии, что исходная пористость заготовки равна 0,3, а ее неоднородным распределением в начале процесса деформирования можно пренебречь. При проведении расчетов полагали, что на границе заготовка – матрица имеет место условие одностороннего контакта совместно с условием трения по Кулону. Коэффициент трения предполагался равным 0,1. Наружный и внутренний диаметр заготовки принимались равными соответственно 30 и 20 мм, а высота – 100 мм. Наружный и внутренний диаметры прокладки в начальном состоянии принимались соответственно 20 и 15 мм.

Модель пластичности пористого тела

Моделирование выполнено на основе континуального подхода. В качестве определяющих соотношений использовали соотношения теории пластичности пористого тела, представляющие собой обобщение существующих эллипсоидальных моделей[6-13].

Уравнение поверхности нагружения принимается в виде:

$$F = \frac{(p - p_0)^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\phi} - \tau_s^2 = 0 \quad , \quad (1)$$

где p_0 - значение шаровой компоненты напряженного состояния, при которой объем не изменяется. Размер полуоси эллипсоидального контура принимается зависящим от p по следующему закону:

$$\begin{cases} \psi = \psi_1 & \text{при } p \leq p_0 \\ \psi = \psi_2 & \text{при } p \geq p_0 \end{cases} \quad (2)$$

Величины материальных функций φ , ψ и P_0 определяются по формулами (3) – (6) :

$$\varphi = \frac{1}{(1+m)^2} \cdot (1-\theta)^3 \cdot (1-|2 \cdot a - 1|)^2, \quad (3)$$

$$\psi_1 = \frac{8}{3} \cdot \frac{(1-\theta)^4}{\theta} \cdot \frac{(1-a)^2}{(1+m)^2} \quad (4)$$

$$\psi_2 = \frac{8}{3} \cdot \frac{(1-\theta)^4}{\theta} \cdot \frac{a^2}{(1+m)^2} \quad (5)$$

$$P_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \tau_s \cdot \frac{(1-\theta)^2}{\sqrt{\theta}} \cdot \left(\frac{1-m-2 \cdot a}{1+m} \right), \quad (6)$$

где, наряду с пористостью θ и приведенным напряжением течения твердой фазы τ_s , входят два новых параметра a и m , изменяющиеся в диапазонах $0 \leq a \leq 1$, $0 \leq m \leq 1$.

Поскольку в точке сопряжения $P = P_0$ уравнение контура нагружения обладает достаточной гладкостью, связь между напряжениями и скоростями пластических деформаций может быть установлена на основе ассоциированного закона течения. Одним из его следствий является наличие прямой пропорциональной зависимости между скоростью изменения объема и разностью $P - P_0$:

$$e \sim P - P_0 \quad (6a)$$

Соотношения для известных моделей вытекают из (1) – (6) при различных сочетаниях a и m . Если $a = 0.5$ и $m = 0$, представленная модель превращается в модель типа [6-7], которая используется для описания поведения связанных пористых тел. При $a = 0.5$ и $m = 1$, соотношения (1) – (6) соответствуют модели Сам – Клау, описывающей несвязанные дисперсные системы. Случай $0 \leq m \leq 1$ соответствует спеченным пористым материалам, содержащим несовершенные контакты. При $0 \leq a \leq 0.5$ и $m = 0$ получаем модель [11].

Для одного из случаев сочетания материальных параметров положение контура нагружения приведено на рис.3.

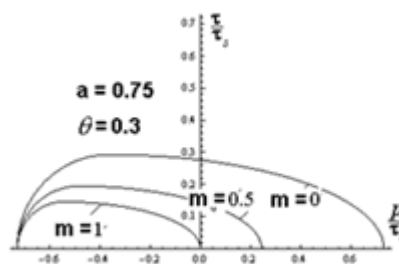


Рис.3. Контурсы поверхности нагружения при различных значениях материального параметра m

Для данной модели может быть введено понятие эквивалентной скорости деформаций, которая определяется из выражения для удельной скорости диссипации энергии

$$w = \frac{\sqrt{\gamma^2 \varphi + e^2 \psi}}{\sqrt{1-\theta}} + \frac{p_0}{\tau_s} \cdot \frac{e}{1-\theta} \quad (7)$$

где e - скорость изменения объема, а $\gamma = \sqrt{\bar{e}_{ij}\bar{e}_{ij}}$ - скорость изменения формы (\bar{e}_{ij} - девиатор скоростей деформаций). Отсюда может быть получено выражение для эквивалентной деформации ω , которая является еще одним параметром состояния.

$$\frac{d\omega}{dt} = w \quad (8)$$

Когда материал несжимаем и пористость отсутствует, параметр ω трансформируется в параметр Одквиста. В том случае, когда сформулирована процедура определения связи между τ_s и ω , указанные соотношения могут быть дополнены условием упрочнения

$$\tau_s = \tau_s(\omega) \quad (9)$$

Для спеченных пористых материалов данное условие может быть принято в том же виде, что и для их твердой фазы. В свою очередь, параметры a и m также могут изменяться в ходе деформирования, вследствие чего и для них могут быть сформулированы уравнения эволюции, чувствительные, однако, к природе порошка и траектории деформирования. Их источником могут быть микромеханический анализ, либо данные экспериментов. В частности, параметр m связан с разносопротивляемостью при растяжении и сжатии. В свою очередь, методика определения параметра a , связанная с определением дилатансии, изложена в [14]. Уравнением эволюции для

пористости является уравнение закона сохранения массы $\dot{\theta} = (1-\theta)e$. Аналогичным уравнением для ω является соотношение (8).

Результаты моделирования. На рис.4 и рис.5. приведено, соответственно, изменение распределения величин пористости и накопленной пластической деформации твердой фазы пористого тела в процессе деформирования, которые были определены в ходе применения метода конечных элементов с использованием модели, описанной выше

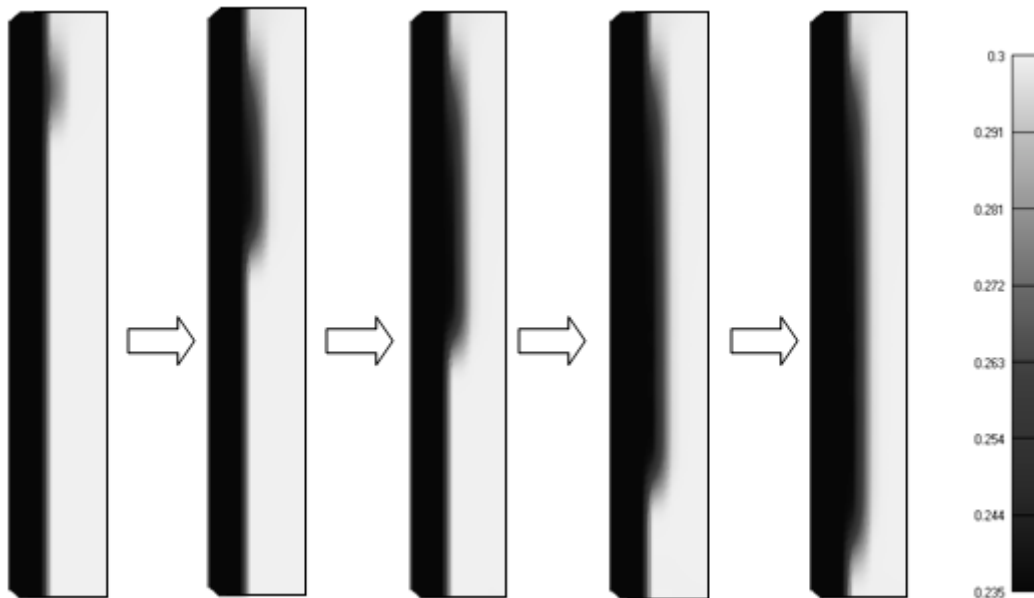


Рис. 4. Изменение распределения пористости в процессе протягивания

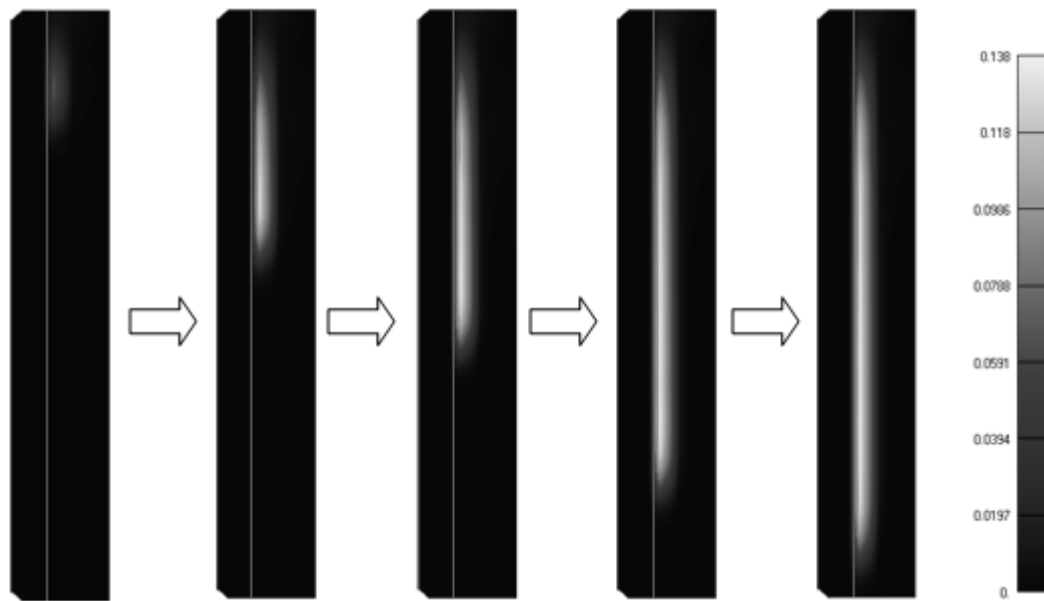


Рис. 5. Изменение распределения накопленной деформации твердой фазы в процессе протягивания

Очаг деформации локализован и ограничен по радиусу. Наличие необратимо деформируемой прокладки вносит существенные коррективы в формирование поля плотности. Наибольшая степень уплотнения достигается в месте контакта инструмента с прокладкой. Одновременно с продвижением инструмента вниз происходит перемещение очага деформации.

Наблюдается формирование установившегося участка вдоль оси втулки, вдоль которого картина распределения плотности в зависимости от радиуса не изменяется. Естественными границами данного участка являются плоскости, параллельные основанию и находящиеся в непосредственной близости от верхнего и нижнего основания. Плотность монотонно убывает от внутреннего радиуса до наружного. При этом наружные участки втулки практически не уплотняются, то есть очаг деформирования ограничен по радиусу.

При деформировании по данной схеме отсутствуют зоны разрыхления, что препятствует разрушению изделия. Такой результат обеспечивается наличием деформируемой прокладки, которая частично обеспечивает дополнительное гидростатического давления.

Распределение деформаций напоминает эволюцию распределения относительной плотности. Справедливы заключения о характере распределения по радиусу и наличии установившегося участка.

Так же, как и в предыдущем случае, наружный участок порошковой втулки практически не деформируется, в то время как ожидаемый эффект поверхностного упрочнения достигается: наиболее продеформированным является внутренний участок втулки, непосредственно контактирующий с прокладкой.

При увеличении количества проходов протягивания наблюдается рост зоны уплотнения в направлении увеличения радиуса (рис.6). При этом величина плотности порошкового материала в области контакта с деформируемой прокладкой возрастает.

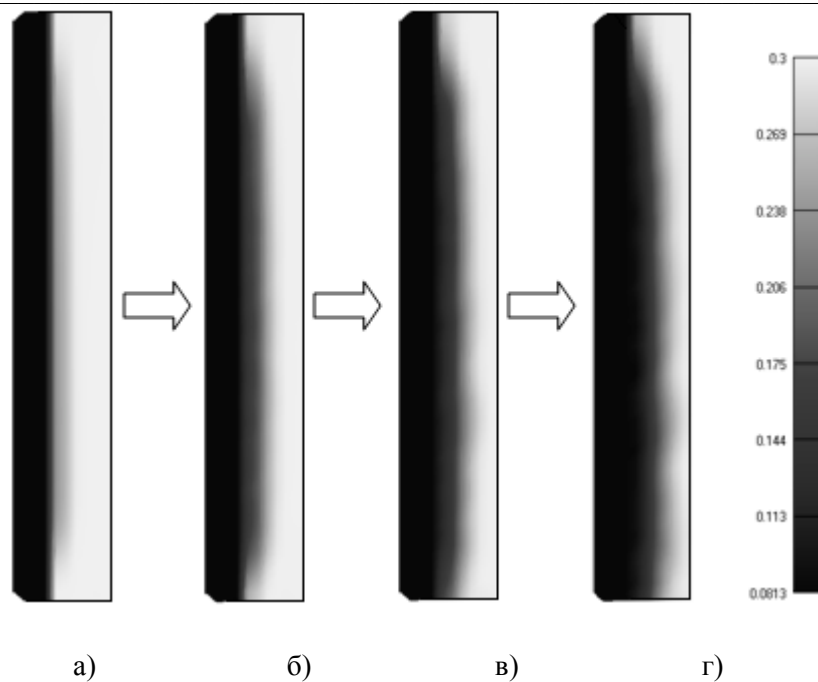


Рис. 6. Изменение величины пористости при увеличении количества проходов: а - после первого прохода; б, в, г - соответственно после четвертого, шестого и восьмого проходов (направление протягивания было постоянным)

Также наблюдается рост области, соответствующей наибольшим величинам накопленной деформации материала основы пористого тела. Общая величина накопленных деформаций при увеличении количества проходов протягивания возрастает (рис.7).

С увеличением количества проходов размер менее деформированных областей у торцов заготовки уменьшается. Более интенсивно этот процесс происходит у нижнего торца порошковой втулки. В то же время верхняя часть втулки деформируется в меньшей степени. В результате распределение свойств изделия по высоте становится неравномерным.

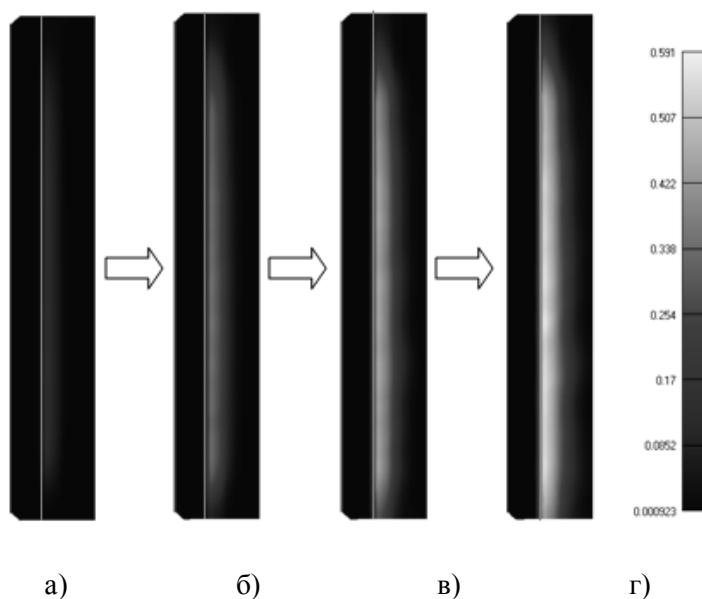


Рис. 7. Изменение величины накопленной деформации твердой фазы при увеличении количества проходов: а - после первого прохода; б, в, г - соответственно после четвертого, шестого и восьмого проходов (направление протягивания было постоянным)

Для получения более равномерного распределения свойств по высоте изделия была рассмотрена схема обработки, предусматривающая изменение направления протягивания после каждого прохода на противоположное. Результаты моделирования приведены на рис.8 и рис.9.

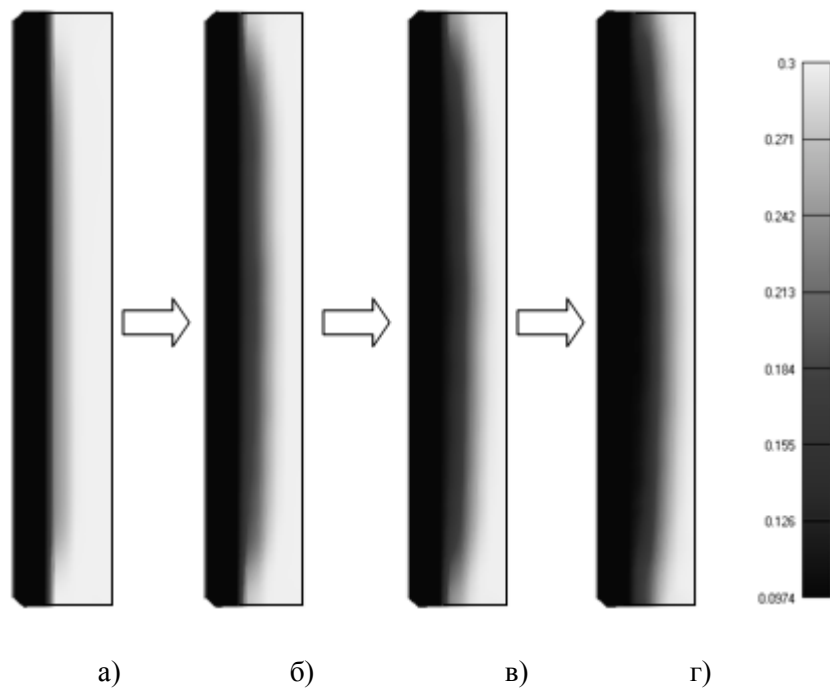


Рис. 8. Изменение величины пористости при увеличении количества проходов: а, б, в, г – количество проходов соответствует рис.5.16 (направление протягивания периодически менялось на противоположное)

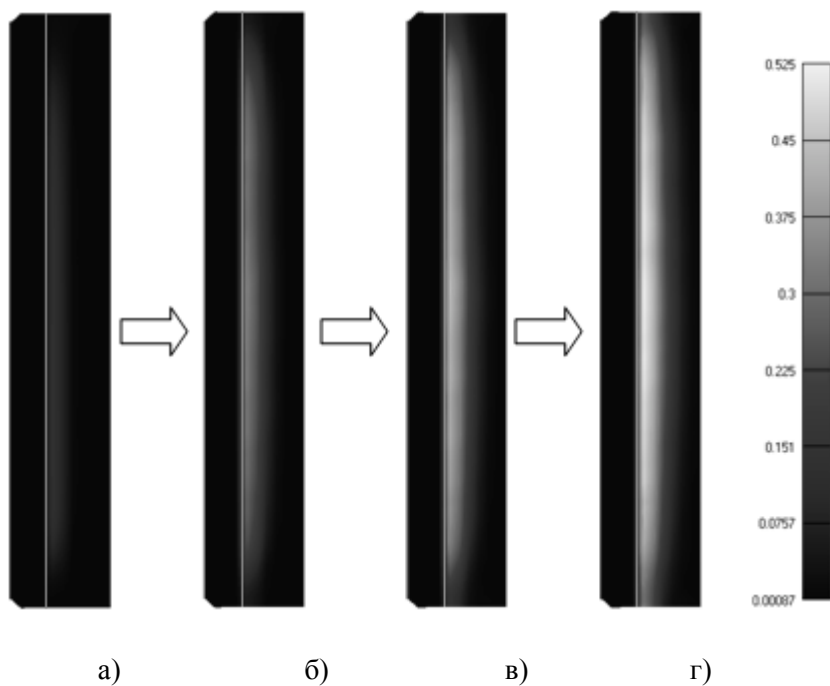


Рис. 9. Изменение величины накопленной деформации твердой фазы при увеличении количества проходов: а, б, в, г – количество проходов соответствует рис.5.17 (направление протягивания периодически менялось на противоположное)

Количество проходов было такое же, как и при одностороннем протягивании. При увеличении количества проходов верхняя и нижняя части заготовки деформируются в равной степени. В результате распределения пористости (рис.8) и величины накопленной деформации твердой фазы (рис.9) становятся более равномерными.

Выводы.

Применение промежуточной деформируемой прокладки позволяет повысить гидростатическую составляющую напряженного состояния уплотняемого порошкового материала при проведении операции протягивания.

Деформация порошковой заготовки происходит локально. В процессе протягивания наблюдается перемещение очага деформации по высоте изделия.

Наибольшие величины плотности и накопленной деформации материала основы пористого тела соответствуют областям, граничащим с деформируемой прокладкой. Области, расположенные у торцов заготовки, деформируются в меньшей степени.

С увеличением количества проходов зоны уплотнения и упрочнения захватывают все большие области изделия. Рост этих зон происходит в направлении увеличения радиуса. При этом размер менее деформированных областей у торцов заготовки уменьшается.

Периодическая смена направления протягивания позволяет получить более равномерное по высоте распределение свойств изделий.

1. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическим деформациям. Краткие основы. М.: Машгиз.– 1949.– 248 с.
2. Реут О.П., Богинский Л.С., Петюшник Е.Е. Сухое изостатическое прессование уплотняемых материалов, Минск, 1998, 255с.
3. Розенберг О.А. Механика взаимодействия инструмента при деформирующем протягивании. Киев: Наукова думка, 1981.– 288 с.
4. Новиков Н.В., Розенберг О.А. О влиянии научного наследия профессора А.М. Розенберга на развитие теории и практики процессов резания и холодного пластического деформирования/ В кн.: Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования. К 100-летию со дня рождения профессора А.М. Розенберга. Киев: ИСМ НАН Украины, 2002.– с.20–32
5. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов.– М.: Металлургия.– 1986.– 224 с.
6. Green, R. G., A plasticity theory for porous solids, Int. Journ. Of Mech. Sci., 1972, **14**, p. 215 -226
7. Shima, S. and Oyane, M., Plasticity theory for porous metals, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 18, Issue 6, June 1976, P. 285-291
8. Скороход В.В., Тучинский Л.И. К вопросу об энергозатратах на уплотнение пористых тел. – Порошковая металлургия. – 1978. – № 9. – с. 16-21
9. Петросян Г.Л. О теории пластичности пористых тел – Изв. Вузов. Сер. Машиностроение, 1977, № 5 – с. 10-14
10. Мидуков В. З., Рудь В. Д. Экспериментальная проверка основных гипотез теории пластичности пористых тел // Порошковая металлургия. – 1982. – № 1. – С. 6–17.
11. Михайлов О.В., Штерн М.Б. Учет разносопротивляемости растяжению и сжатию в теориях пластичности пористых тел//Порошковая металлургия.-1984. - N 5. - с.11-17
12. Штерн М.Б., Развитие теории прессования порошков и механики деформирования пористых тел // Порошковая металлургия. – 1992. – № 9. – с. 15-29
13. Штерн М.Б., Рудь В.Д. Механічні та комп'ютерні моделі консолідації гранульованих середовищ на основі порошків металів і кераміки при деформуванні та спіканні: Монографія. – Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2009. – 287с.
14. M. Shtern, O. Mikhailov Defects Formation in Die Compaction: Prediction and Numerical Analysis - in Proceeding of Powder Metalurgy European Congress, 22 - 24 October, 2001, Nice, France, Vol.3, 50-57