

# Инструмент, порошки, пасты

---

УДК 621.77

О. А. Розенберг, Е. А. Пащенко, А. П. Майданюк,  
О. В. Михайлов, М. Б. Штерн (г. Киев)  
Е. Олевский (г. Сан-Диего, США)

**Эволюция распределения плотности,  
накопленной деформации и топологических  
особенностей порошковых цилиндрических  
заготовок в условиях деформирующего  
протягивания**

**Сообщение 1. Моделирование и анализ  
распределения плотности и накопленной  
деформации в порошковых телах,  
сформированных с использованием  
различных схем деформирующего  
протягивания**

*Представлены результаты исследования строения порошковых тел, подвергнутых пластическому деформированию путем протягивания. Рассмотрены различные схемы деформирующего протягивания, предусматривающие прямой контакт поверхности заготовки с деформирующим элементом и протягивание в замкнутой системе. Приведена математическая модель процесса и представлены расчетные картины распределения плотности и накопленной деформации порошковых прессовок в различные моменты деформирования. Сопоставлены структурные проявления применения обеих схем деформирующего протягивания.*

**Ключевые слова:** порошковый компакт, пластическое деформирование, накопленная деформация, пористость.

**Введение.** Операция раздачи по внутреннему диаметру достаточно хорошо известна как в традиционной обработке давлением [1], так и порошковых технологиях [2]. Обычно она используется для калибровки внутренней поверхности втулок, полученных различными путями, в частности, по схеме прессования порошков в жесткой матрице или радиального изостатического уплотнения. В обоих случаях внутренние напряжения, накапливаемые в ходе предварительного уплотнения, способствуют упругой ре-

© О. А. РОЗЕНБЕРГ, Е. А. ПАЩЕНКО, А. П. МАЙДАНИЮК, О. В. МИХАЙЛОВ, М. Б. ШТЕРН,  
Е. ОЛЕВСКИЙ, 2008

лаксации, выражающейся в уменьшении внутреннего радиуса спрессованной втулки, в силу чего и возникает необходимость использования деформирующего протягивания как калибрующей операции. В то же время, указанный тип обработки порошковых материалов может рассматриваться и как самостоятельный метод компактирования, отличающийся от известного метода радиально-изостатического уплотнения. При этом сама операция раздачи по внутреннему диаметру может применяться как по отношению к пористой заготовке, так и к неспрессованному порошку. В отличие от обработки деформирующим протягиванием компактных металлов, порошковые втулки могут изменять свой объем, что позволяет осуществлять их обработку в условиях существенного ограничения кинематики их течения. В частности, возможно их деформирование лишь за счет увеличения внутреннего радиуса при неизменном наружном [3].

Вместе с тем указанный тип обработки внутренней поверхности часто выполняет те же функции, что и обычное поверхностное упрочнение. Специальные методы поверхностной обработки — совмещение указанного типа уплотнения с поверхностной обработкой по внутреннему радиусу — предложены проф. О. А. Розенбергом и его сотрудниками в ИСМ НАН Украины [4].

В последние годы такой характер упрочнения рассматривают как один из путей достижения ультрамелкозернистой структуры (УМЗС) [5]. Это, в свою очередь, обеспечивает и достижение более высоких прочностных характеристик. При этом формирование УМЗС обычно связывают с большими пластическими деформациями [5], предполагая наличие высокого уровня накопления сдвиговых компонент деформации. В настоящее время существенное внимание уделяют изучению физических аспектов проблемы накопления сдвиговых деформаций [6]. Изучают механизмы пластического течения, которые связываются с конкретными носителями деформаций. Достаточно подробно возникающие при этом проблемы рассмотрены в [7—9].

В то же время, практика обработки давлением свидетельствует, что использование схем нагружения, обеспечивающих достижение больших деформаций [1, 2], обычно сопровождается повышенным риском разрушения материалов. При этом процессам разрушения при больших деформациях обычно предшествует накопление дефектов. Можно утверждать, что наиболее желаемые схемы деформации находятся в области, когда материал приближается к исчерпанию второго предельного состояния, а само деформирование балансирует на грани устойчивого поведения материалов [10, 11].

Здесь, наряду со структурными, не менее важны макро- и мезоскопические аспекты поведения материалов [10, 11], в частности, контроль близости напряженно-деформированного состояния к предельному. Один из путей контроля состоит в отслеживании накопления дефектов. Наиболее распространенным типом дефектов являются поры. Их рост и возникновение новых пор приводит к усилению роли разупрочнения и приближает поведение материала к неустойчивому.

Методы контроля устойчивости, основанные на анализе кинематических аспектов поведения материалов, в частности, учитывающие эволюцию пор и их влияние на напряженно-деформированное состояние, в настоящее время достаточно успешно апробированы в теории пластичности компактных материалов, где поры возникают в ходе деформирования [12]. В том случае, когда наличие пор связано с генезисом материала, в том числе, с его порошковым происхождением, могут быть использованы теории пластичности пористых тел [13—16].

Объектом исследования в данной работе было радиальное деформирование порошковых втулок путем протягивания с одновременным упрочнением внутренней поверхности. Были рассмотрены две схемы деформирования: протягивание по внутренней поверхности пористой заготовки, непосредственно находящейся в контакте с инструментом (схема 1), и деформирующее протягивание двухслойного цилиндра, внутренним слоем которого является стальной цилиндрический контейнер, а наружным — неспеченная прессовка (схема 2). При реализации первой из схем перемещение оснований заготовки в осевом направлении не ограничивали, в то время как при деформировании по схеме 2 осевые перемещения концевых элементов заготовки отсутствуют. Сравнивали две схемы с точки зрения эволюции как распределения плотности для каждой из них, так и накопленной в материале порошка деформации твердой фазы. Последнюю и связывали с формированием УМЗС. При этом особое внимание было уделено возможности одновременного достижения высокой плотности и высокой степени деформации твердой фазы.

Также изложены данные экспериментального исследования эволюции пористой структуры, понимая под этим проницаемость порошковых сред по отношению к жидким зондирующим агентам, а также те прямые и косвенные следствия, которые открывают путь к пониманию того вклада в формирование свойств, который вносит внутренняя топология.

Структурно работа представлена в виде двух сообщений, первое из которых нацелено на оценку состояния деформируемого изделия по данным расчетов на основании МКЭ. Второе — непосредственно связано с анализом внутренней топологии пористой структуры и ее эволюции при деформировании.

**Схемы деформирования.** Целью технологических операций, описанных ниже, является получение втулки, изображенной на рис. 1.

Рассмотрены две технологические операции. Первая обеспечивает одновременное уплотнение и поверхностное упрочнение пористой цилиндрической заготовки в ходе прямого контакта внутренней поверхности заготовки с протягивающим инструментом (рис. 2).

Вторая схема предполагает наличие промежуточного цилиндрического контейнера, внешняя поверхность которого соприкасается с порошковой заготовкой, а внутренняя воспринимает воздействие протягивающего инструмента (рис. 3).

**Математическая модель процесса.** Для каждой из рассмотренных схем деформирования изучена эволюция распределения плотности и накопленной деформации твердой фазы. Применяемые для анализа математические модели основаны на теории пластичности пористых тел. В



Рис. 1. Втулка, полученная из пористого материала.

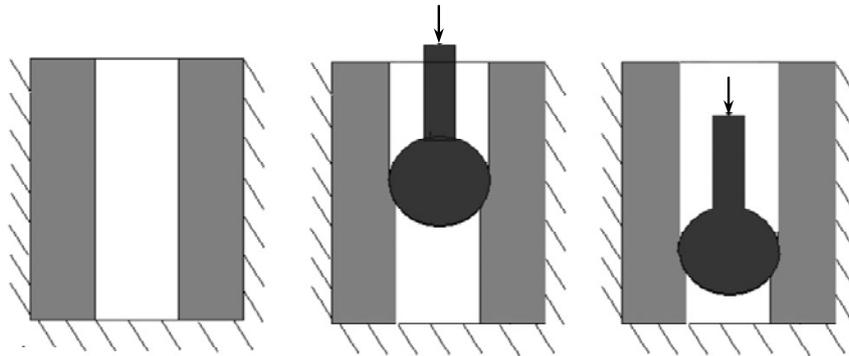


Рис. 2. Одновременное уплотнение и поверхностное упрочнение пористой цилиндрической заготовки в ходе прямого контакта внутренней поверхности заготовки с протягивающим инструментом.

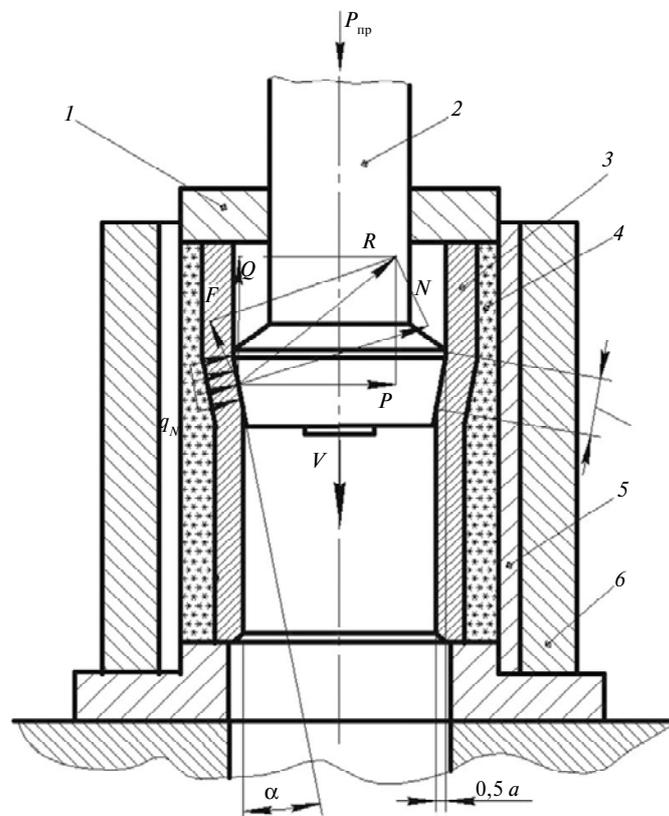


Рис. 3. Компактирование и поверхностное упрочнение по схеме 2: 1 — ограничитель; 2 — оправка с деформирующим элементом; 3 — технологическая втулка; 4 — порошковый континуум; 5 — разрезная втулка; 6 — матрица.

данной работе использован вариант теории, предложенный в [13—16]. В его основе лежит представление о пластическом потенциале, как о функции компонентов тензора напряжений, которой в пространстве напряжений соответствуют гладкая, выпуклая и замкнутая поверхности. На основе многочисленных экспериментальных и теоретических исследований он может быть представлен в форме

$$F = \frac{\tau^2}{\varphi} + (1+m)^2 \frac{(p + \frac{m}{m+1} \bar{\rho} \sigma_s \sqrt{\psi})^2}{\psi} - \bar{\rho} \sigma_s, \quad (1)$$

где  $p = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$ ,  $\tau = \sqrt{(\sigma_{ij} - p \delta_{ij})(\sigma_{ij} - p \delta_{ij})}$  — инварианты тензора напряжений: среднее давление и интенсивность касательных напряжений. Особую роль в дальнейшем изложении играют пористость  $\theta$  или относительная плотность  $\bar{\rho}$ , связанная с пористостью очевидным соотношением  $\bar{\rho} = 1 - \theta$ . На основании работы В. В. Скорохода [17] принимаем, что  $\varphi = (1 - \theta)^2$ ,  $\psi = \frac{2(1 - \theta)^2}{3\theta}$ . Параметр  $m$  характеризует степень несовершенства контактов в порошковой заготовке. Он же определяет различное сопротивление пористой заготовки при ее испытании на растяжение и сжатие. Параметр  $\sigma_0$  характеризует напряжение течения твердой фазы пористого тела. Изменение объема вследствие пластической деформаций оценивали в рамках данной модели скоростью изменения объема

$$e \approx \frac{2(1+m)^2}{\psi} p + \frac{2m(1+m)\sigma_0}{\sqrt{\psi}}. \quad (2)$$

Для интерпретации полученных в данном рассмотрении результатов оказывается весьма полезной формула, связывающая касательные напряжения и скорость сдвиговых деформаций, которая, также как и формула (2), вытекает из принципа нормальности, примененного к условию пластичности (1):

$$\gamma \approx \frac{2}{\varphi} \tau. \quad (2a)$$

Скорость накопления деформаций в твердой фазе пористого тела в рамках данной модели может быть определена на основе постулата В. В. Скорохода [17] об однозначности диссипативной функции:

$$w = \sqrt{1 - \theta} \left( -\frac{m}{1+m} \sqrt{\psi} e + \frac{\sqrt{(1+m)^2 \gamma^2 \varphi + e^2 \psi}}{1+m} \right). \quad (3)$$

Саму же величину накопленной пластической деформации, обозначаемую далее как  $\omega$ , можно восстановить путем решения дифференциального уравнения

$$\frac{d\omega}{dt} = w. \quad (4)$$

Напряжение течения  $\sigma_0$  является функцией от  $\omega$ . Данная функция соответствует диаграмме упрочнения материала порошка при одноосном растяжении.

Указанная математическая модель является основой как для вычисления полей скоростей и напряжений, так и для определения текущих значений  $\omega$  и  $\theta$ . С этой целью применяют метод конечных элементов, который может быть представлен в виде последовательности хорошо известных процедур, первой из которых является триангуляция области пластически деформируемого тела или переход от сплошной заготовки к ее конечноэлементному аналогу. При этом используют требование экстремальности функционала

$$D(\bar{v}(x)) = \int_{\Omega} W \frac{1}{\rho} d\Omega + \int_{\partial\Omega_p} p_i v_i d(\partial\Omega). \quad (5)$$

Модель, описанная выше, а также ключевые вычислительные процедуры были имплементированы в пакет прикладных программ ABAQUS Subroutine UMAT, 6.7 – version, 08sdsu – License.

**Начальные и граничные условия.** Анализ выполнен при условии, что исходная пористость заготовки равна 0,3, а ее неоднородным распределением вначале 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 предполагали равным 0,1. Наружный и внутренний диаметры заготовки принимали равными соответственно 30 и 20 мм, начальную высоту — 100 мм, наружный и внутренний диаметры прокладки в начальном состоянии — соответственно 20 и 15 мм.

**Эволюция распределения плотности и накопления деформаций твердой фазы при деформировании по схеме 1.** Схематически процесс представлен на рис. 2. Результаты расчетов распределения плотности и накопленной деформации твердой фазы для пяти различных моментов деформирования приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

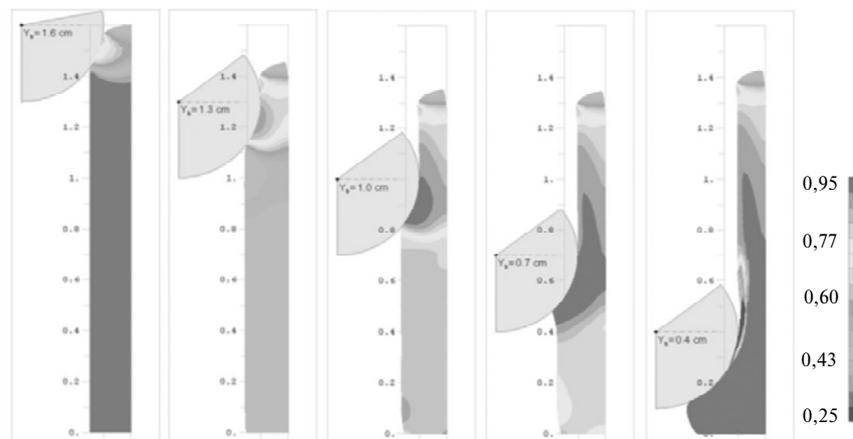


Рис. 4. Распределение относительной плотности в различные моменты времени при деформировании пористой заготовки по схеме 1.

На начальных стадиях процесса уплотнение носит локальный характер. В то время как часть заготовки, удаленная от места контакта с деформирующим элементом не уплотняется, в зоне контакта уплотнение весьма интенсивно и в некоторых точках плотность достигает более 90 %. В этом смысле по аналогии со многими распространенными процессами обработки давлением компактных материалов можно утверждать, что на начальных стадиях формируется очаг уплотнения. По мере деформирования уплотнение захватывает все новые и новые области, в то время как относительная плотность в очаге уплотнения резко возрастает. Уже на четвертом этапе в окрестности деформирующего элемента можно наблюдать образование так называемого наката или волны деформирования — начинается выпучивание материала.

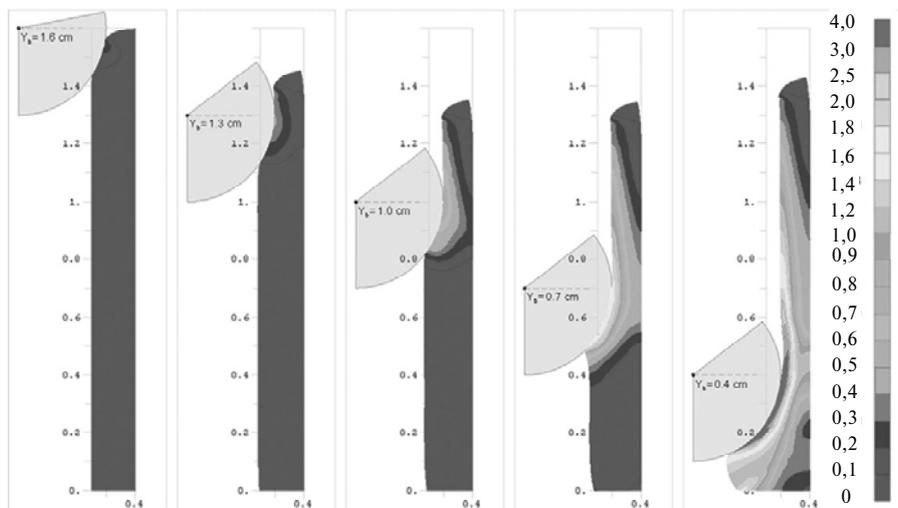


Рис. 5. Распределение накопленной деформации твердой фазы в различные моменты времени при деформировании пористой заготовки по схеме 1.

Анализ ситуации на пятом этапе свидетельствует о начале формирования в очаге уплотнения существенной неоднородности. В частности, в местах поверхности заготовки, находящихся позади места ее контакта с инструментом, возникают зоны довольно интенсивного локального разуплотнения. В некоторых местах плотность опускается до ее начальных значений.

Указанное явление связано с тем, что на предшествующих стадиях участки поверхности, находившиеся в контакте с инструментом, в значительной мере уплотнились и обрели способность сопротивляться растягивающим нагрузкам. В силу внешнего трения в области пятна контакта начали развиваться растягивающие напряжения, что, в конечном счете, и привело к изменению знака гидростатического напряжения, которое стало растягивающим. В этом случае, как вытекает из формулы (2), имеет место рост объема и уменьшение относительной плотности, что и объясняет наличие зон разуплотнения на конечных стадиях.

Подобно очагу уплотнения уже в начале деформирования развивается очаг накопления деформаций твердой фазы, который, как это присуще достаточно распространенным методам обработки давлением, очевидным образом локализован. Если уплотнение, хоть и в небольшой степени, распространяется на весь объем образца уже на начальных стадиях, накопление деформаций на протяжении большей части процесса деформирования локализовано в зоне контакта заготовки и инструмента. Лишь в конце процесса деформирования практически вся заготовка.

Обращают на себя внимание аномально высокие значения накопленной пластической деформации твердой фазы в зоне контакта инструмента и поверхности заготовки, а также значительная степень неоднородности ее распределения в этой области. Указанное обстоятельство является следствием интенсивного поверхностного упрочнения участков поверхности, находившихся в контакте с инструментом на предыдущих стадиях.

**Эволюция распределения плотности и накопления деформаций твердой фазы при деформировании по схеме 2.** Процесс реализуется согласно схеме, приведенной на рис. 3. В отличие от рассмотренного выше, использу-

ется промежуточная деформируемая прокладка, разграничивающая инструмент и внутреннюю поверхность заготовки. На рис. 6 и 7, на которых представлены результаты расчетов, прокладка расположена слева.

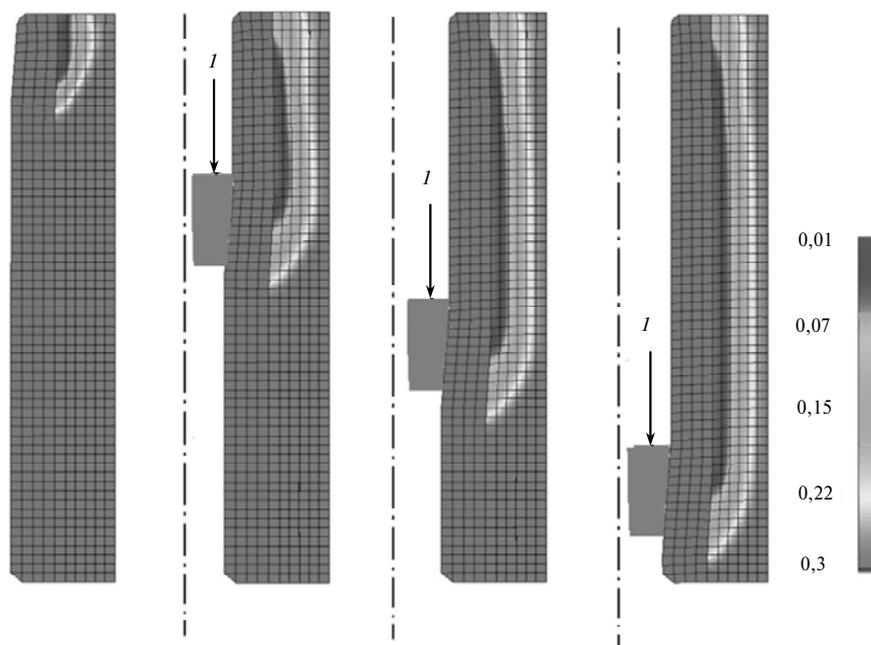


Рис. 6. Распределение плотности в различные моменты деформирования при деформировании по схеме 2.

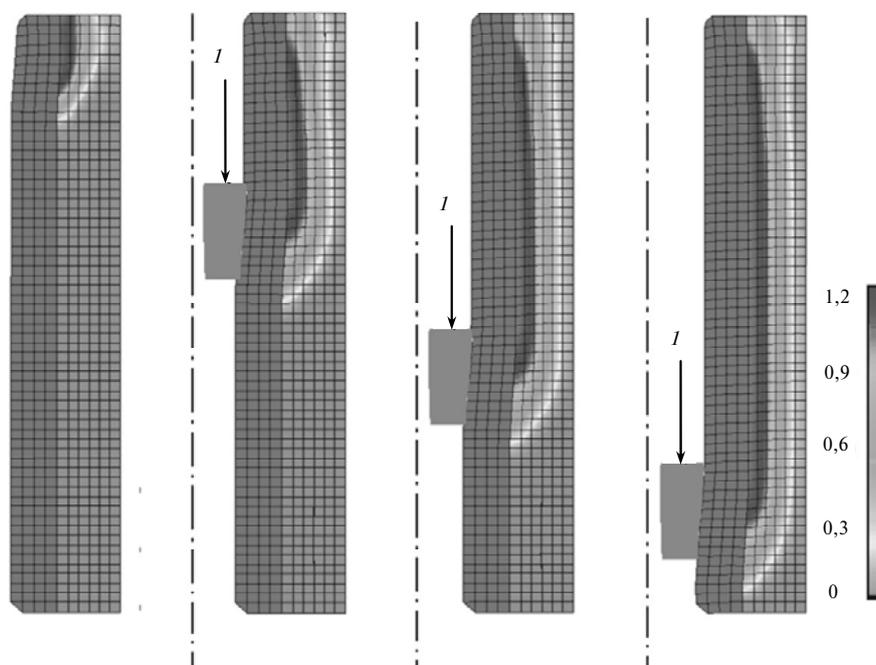


Рис. 7. Распределение накопленной деформации твердой фазы в различные моменты деформирования при использовании схемы 2.

В отличие от схемы 1 очаг деформации в данном случае 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. Однако в отличие от предыдущего случая по мере продвижения инструмента вниз распределение плотности остается неизменным. Анализ рисунка позволяет утверждать, что в отличие от схемы 1 наблюдается формирование установившегося участка вдоль оси втулки, т. е. такого участка заготовки, вдоль которого картина распределения плотности не изменяется. Естественными границами данного участка являются плоскости, параллельные основанию, находящиеся в непосредственной близости от верхнего и нижнего основания. Плотность монотонно убывает от внутреннего радиуса до наружного. При этом уплотнение практически не достигает наружных участков втулки и в этом смысле очаг деформирования ограничен по радиусу.

Существенное различие между двумя рассматриваемыми случаями заключается в том, что при деформировании по схеме 2 полностью отсутствуют зоны разрыхления. Это очевидным образом свидетельствует о том, что в отличие от схемы 1, где на последней из рассмотренных стадий имело место разрыхление, вероятность разрушения в данном случае процесса практически отсутствует.

Это обеспечивается наличием деформируемой прокладки, которая частично выполняет функции дополнительного гидростатического давления. Отметим, что при деформировании по схеме 1 внутренняя поверхность заготовки во все моменты остается свободной, что резко увеличивает касательную составляющую, понижая при этом гидростатическую.

Иная, по сравнению со схемой 1, формируется и картина распределения накопленной деформации твердой фазы.

В целом, картина распределения деформаций напоминает проиллюстрированную на рис. 6 эволюцию распределения плотности. Справедливы заключения о характере распределения по радиусу и наличии установившегося участка. Также, как и в предыдущем случае, наружный участок практически не деформируется, в то время как ожидаемый эффект поверхностного упрочнения достигается — наиболее продеформированным является участок под прокладкой.

В то же время максимальная величина накопленной деформации оказывается существенно ниже, чем при деформировании по схеме 1. Обсуждение данного факта следует ниже.

**Обсуждение результатов.** Полученные результаты анализируют с учетом поставленной в данном исследовании задачи — обеспечить максимальное уплотнение пористой цилиндрической заготовки, достигнув при этом максимально возможного поверхностного упрочнения ее внутренней поверхности.

Деформирование по схеме 1 характеризуется тем, что внутренняя поверхность заготовки свободна от напряжений. Это позволяет добиться высокого уплотнения лишь в приконтактных областях. По мере продвижения инструмента наличие свободной поверхности влечет частичную потерю устойчивости и обрабатываемая поверхность может терять устойчивость, что и продемонстрировано на примере схемы 1. Здесь, естественно, определенную роль играет выбор геометрии заготовки, внешнее трение и скорость прохождения инструмента. Однако решающим является то обстоятельство, что обрабатываемая поверхность свободна.

Одним из явлений, наблюдаемых одновременно с потерей геометрической устойчивости, является появление на упрочняемой части поверхности участков, где фиксируются аномально высокие значения накопленной деформации. Отмеченное обстоятельство можно было бы рассматривать как достижение поставленной цели в плане поверхностного упрочнения. Между тем, именно на этих участках поверхности наблюдается особенно активное разуплотнение на завершающих стадиях процесса — имеет место рост пористости до ее значений, превышающих начальную, что уже можно рассматривать как факт локального разрушения. При деформировании по данной схеме пористость вообще характеризуется высокой степенью ее неравномерного распределения по объему.

Сказанное выше является выражением того известного факта, что достижение высоких степеней накопленной деформации при отсутствии кинематических ограничений сопряжено с потерей устойчивости и формированием существенно неоднородного поля плотности, в котором могут присутствовать участки разуплотнения, что в свою очередь может сопровождаться локальным разрушением.

Из сказанного выше очевидно, что достижение приемлемых результатов может быть не более чем компромиссным решением, где, по-видимому, следует вносить существенные коррективы в схему деформирования. Такое решение, предложенное проф. О. А. Розенбергом, заключалось в наложении кинематических ограничений, в частности, использовании деформируемой прокладки. Это обстоятельство, естественно, привело к ужесточению схемы деформирования — возросла абсолютная величина гидростатической составляющей, которая в данном случае работает на сжатие (см. формулу (2)). В то же время в соответствии с условием пластичности (1) увеличение абсолютной величины гидростатической составляющей влечет заметное уменьшение макроскопической интенсивности касательных напряжений  $\tau$ . Как это следует из уравнения (3) уменьшается и вклад скоростей сдвиговых деформаций. Указанное обстоятельство может быть установлено на основе анализа контура нагружения (1) и ориентации рассматриваемых схем относительно него (рис. 8). Чем точка контура ближе к состоянию всестороннего сжатия, тем жестче соответствующая ей траектория нагружения.

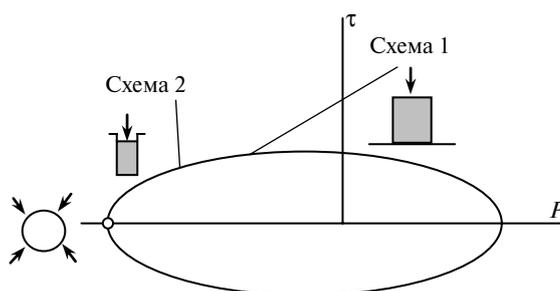


Рис. 8. Ориентация схем 1 и 2 относительно контура нагружения.

В то же время ужесточение схемы деформирования не приводит к полному закреплению перемещений всех участков поверхности. В частности, в силу того, что прокладка деформируема, на внутренней поверхности скорость сдвиговой компоненты не равна нулю.

## Выводы

Реализация схем деформирования, характеризующихся значительными сдвиговыми деформациями, связана с риском возрастания темпа накопления повреждений или роста пористости.

Предотвращение разрушения может быть основано на применении элементов гидростатического обжатия.

Возможность достижения наноструктуры при сохранении целостности образца обеспечивается за счет выбора соответствующей траектории нагружения, пердусматривающей “разумное” соотношение между девиаторной и шаровой компонентами тензора напряжений.

1. *Смирнов-Аляев Г. А.* Соппротивление материалов пластическим деформациям. Краткие основы. — М.: Машгиз. — 1949. — 248 с.
2. *Реут О. П., Богинский Л. С., Петюшик Е. Е.* Сухое изостатическое прессование уплотняемых материалов. — Минск: Дэбор, 1998. — 258 с.
3. *Розенберг О. А.* Механика взаимодействия инструмента при деформирующем протягивании. — Киев: Наук. 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 // 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. *Валиев Р. З., Александров И. В.* Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. — М.: Логос, 2000. — 271 с.
7. *Beygelzimer Y.* Grain refinement and viscous fracture of metals during severe plastic deformation: mathematical simulation // Nanostructured Materials By High-Pressure Severe Plastic Deformation / Ed. by Y. T. Zhu, V. Varyukhin. — Boston; Dordrecht; London: Springer, 2005. — P. 181—185.
8. *Park J.-J., Shin D. H.* Numerical analysis of plastic deformation in constrained groove pressing // Ultrafine Grained Materials II / Ed. by Y. T. Zhu, T. G. Langdon, R. S. Mishra et al. — TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2002. — P. 253—258.
9. *Konstantinova T. E., Primisler V. B., Dobrikov A. A.* Bending of a crystal lattice as an independent form of plastic deformation // Met. Phys. Adv. Tech. — 1997. — **16**. — P. 1191—1201.
10. *Сегал В. М., Резников В. И., Копылов В. И. и др.* Процессы пластического структурообразования металлов. — Минск: Навука и тэхніка. — 1994. — 232 с.
11. *Segal V. M.* Slip line solutions, deformation mode and loading history during equal channel angular extrusion // Mater. Sci. Eng. A. — 2003. — **345**, N 1—2. — P. 36—46.
12. *Tvergaard V.* Effect of yield surface curvature and void nucleation on plastic flow localization // J. Mech. Phys. Solids. — 1987. — **35**, N 1. — P. 43—91.
13. *Штерн М. Б.* Особенности плоской деформации пористых тел // Порошк. металлургия. — 1982. — № 3. — С. 16—22.
14. *Штерн М. Б., Михайлов О. В.* Контроль распределения плотности и предсказание разрушения при прессовании порошков в жесткой матрице на основе компьютерного моделирования // Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования. — Киев: ИСМ НАН Украины, 2002 — С. 434—441.
15. *Shtern M., Mikhailov O.* Defects formation in die compaction: prediction and numerical analysis // Proc. Powder Metallurgy European Congress, Nice, France, 22—24 Oct., 2001. — Vol. 3. — P. 50—57.
16. *Beygelzimer Y.* Grain refinement versus voids accumulation during severe plastic deformations of polycrystals: mathematical simulation // Mech. Mater. — 2005. — **37**. — P. 753—767.
17. *Скорород В. В.* Реологические основы теории спекания. — Киев: Наук. думка, 1972. — 140 с.

Ин-т сверхтвердых материалов

Поступила 07.02.08

им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Ин-т проблем материаловедения

им. И. Н. Францевича НАН Украины

Ун-т штата Калифорния