

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 2. Эволюция внутренней
топологии полых цилиндрических пористых
заготовок при упрочнении их внутренних
поверхностей с одновременным
уплотнением методом протягивания**

Проанализированы особенности строения порового пространства порошковых тел, полученных методом деформирующего протягивания и обычным осевым прессованием. На основе экспериментальных данных обсуждена возможность выделения особой составляющей объема пор, связанной с областью межчастичных контактов. Рассмотрена топологическая неоднородность порового пространства порошковых компактов.

Ключевые слова: поровое пространство, порошковый компакт, зондирование, структура.

Введение. Как свидетельствуют данные прогноза распределения накопленной деформации при различных схемах нагружения порошкового компакта, характер напряженно-деформированного состояния дисперсной среды будет в этих случаях существенно различным [1, 2]. Соответственно, будут различными те выборки степеней свободы частиц порошка из общего ансамбля (обусловленного физико-химической природой и условиями получения порошка), которые были задействованы в формировании именно данной структуры порошкового тела. При этом для участков объема компактов, имеющих равную общую пористость, характерные размеры пор, выраженные в линейных или объемных единицах, будут близки.

Для компактов, изготовленных из одного и того же порошка и подвергнутых уплотнению по разным схемам, практически любые статические харак-

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

теристики их внутренней геометрии при равной общей пористости будут очень близки. Под статическими характеристиками авторы подразумевают такие количественные показатели объемно-геометрического состояния порошкового тела, которые становятся доступными для измерения в результате установления некоего равновесия газовой или жидкой среды в поровой системе. Это — большинство известных методов порометрии или определения удельной поверхности дисперсных тел. Другой тип статистических методов — качественные и количественные подходы к оценке строения поровой системы с использованием оптической или электронной микроскопии.

Результаты и обсуждение. Анализ строения порошковых тел на основе данных, полученных статическими методами, может приводить к своеобразному парадоксу: при практическом совпадении количественных характеристик, таких как распределение пор по объемам и площадям поверхностей, на качественном уровне может наблюдаться заметное визуальное различие. Картина, приведенная на рис. 1, иллюстрирует качественный характер визуального отличия строения компактов порошка железа, полученных путем осевого прессования (*а*) и деформирующим протягиванием по схеме (2) [3] — (*б*).

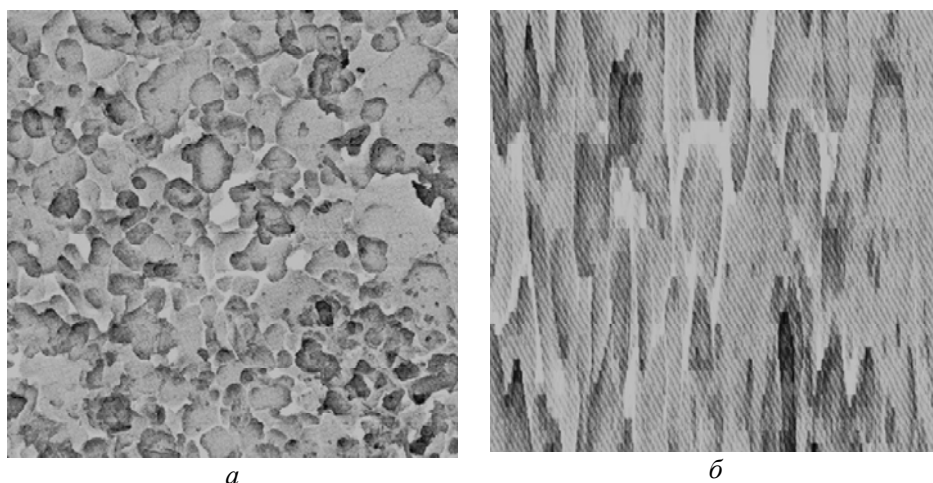


Рис. 1. Визуальное различие строения поровой системы компактов порошков, полученных осевым прессованием (*а*) и деформирующим протягиванием (*б*).

К сожалению, получить плоский, неискаженный по структуре шлиф и, соответственно, четкий электронный снимок сечения порошкового компакта весьма сложно, но пример тенденции к изменению очертаний при изменении схемы уплотнения пор отражен на рис. 1 достаточно адекватно.

В таком несовпадении визуально оцениваемой степени различия формы пор, с одной стороны, и их объективных количественных объемно-геометрических параметров, с другой, содержится указание на недостаточность статистических методов описания порового пространства порошковых сред. Для понимания того, каким образом “генетические” различия двух идентичных по составу компактов с одинаковой общей пористостью, одинаковыми средними размерами и близким пространственным распределением пор, могут порождать существенную разницу в их свойствах, необходимо оценивать топологические свойства их порового пространства.

При статическом подходе авторы оценивают набор “масштабных отрезков”, которые могут быть размещены в порах порошковой среды и которые в своей совокупности описывают то, что называют геометрией пор. Полная однородность порового пространства, представляемого одномодальной плотностью распределения величин таких масштабных отрезков, считается очевидной. Действительно, если производить зондирование порового пространства путем удаления жидкости, заполняющей поры, при нагреве при постоянном давлении или “откачкой” при постоянной температуре, то отрезки траекторий зондирующих молекул равные по протяженности, будут одинаковыми по форме для любых участков в объеме пор. Это — проявление геометрической однородности порового пространства. В то же время, энергия, необходимая зондирующим молекулам на преодоление этих геометрически идентичных отрезков пути, может оказаться различной в разных областях порового пространства, что является проявлением топологической неоднородности последнего, обнаруженной авторами экспериментально [3, 4].

Подобную неоднородность можно обнаружить при анализе динамических характеристик порового пространства порошковых компактов, простейшей из которых может служить кинетическая кривая удаления зондирующего растворителя [1]. Можно выделить два масштабных уровня, на которых проявляется топологическая неоднородность. Один из них связан с основным объемом пор и присущ далеко не всем схемам уплотнения. Собственно, в настоящее время авторы зафиксировали его только для ступенчатого деформирования в замкнутом объеме (схема О. А. Розенберга) [3]. Второй предположительно связан с “приконтактной” составляющей объема пор и, если это предположение верно, должен быть универсальным для порошковых сред разной природы [4].

Наличие определенной доли порового пространства, которая требует от мигрирующих в ней молекул вещества-зонда большей затраты энергии на преодоление единицы длины пути, свойственно порошкам, подвергнутым компактированию. Такая четко (с нарушением одномодальности кривой зондирования, рис. 2) выделенная составляющая зондирующего вещества, для удаления которого нужна повышенная энергия, не связана ни с его адсорбцией на поверхности частиц порошка, ни с наличием вогнутых участков внутренней поверхности компакта, которые более прочно удерживают жидкость.

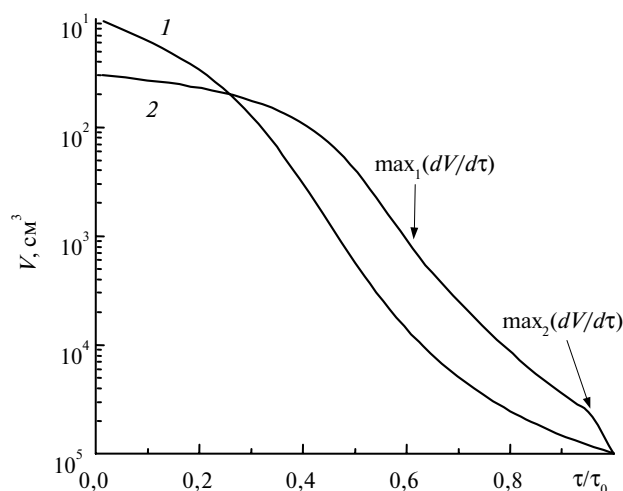


Рис. 2. Динамика удаления зондирующего растворителя из порового пространства свободнасыпанного порошка (1) и компакта (2).

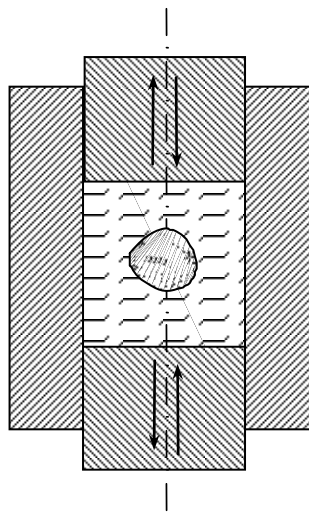


Рис. 3. Схема эксперимента по всестороннему растяжению порошкового компакта.

Это доказывается отсутствием такой составляющей для свободно-насыпанного порошка (см. рис. 2).

Анализ динамических характеристик порового пространства компактов позволяет проследить эволюцию структуры порошковой среды при различных внешних воздействиях. Так, связь “второго максимума скорости зондирования” (см. рис. 2) с приконтактной составляющей объема пор была прослежена в экспериментах по всестороннему растяжению компактов, полученных в разных условиях (рис. 3). В ходе экспериментов образец компактированного порошка, пропитанный органическим растворителем, помещали в

среду высокомолекулярного силиконового масла и нагревали до температуры 70—80 °С для удаления растворителя. При этом легко кипящий растворитель, совместимый с силиконовым маслом, удалялся из пористого компакта, который в то же время был защищен от заполнения его пор воздухом. Далее образец подвергали растяжению по представленной схеме, пропитывали зондирующим растворителем (диметилсульфоксидом), подвергали частичной сушке [4], после чего исследовали кинетику удаления оставшегося растворителя, связанного со вторым максимумом скорости зондирования.

Результаты представлены на рис. 4, 5. Они подтверждают качественное отличие строения компактов, полученных деформирующим протягиванием в замкнутом объеме, от образцов, уплотненных по другим схемам. Некоторые предположения относительно природы этих отличий схематически иллюстрируют рис. 4, 5.

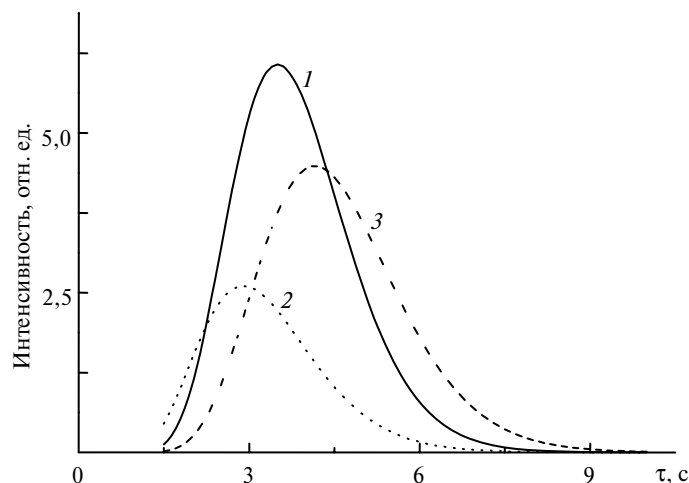


Рис. 4. Дифференциальные кинетические кривые удаления зондирующего растворителя из пор компакта порошка железа, полученного осевым прессованием: исходный компакт (1), компакт после всестороннего растяжения (2), компакт после всестороннего растяжения с последующим всесторонним обжатием (3).

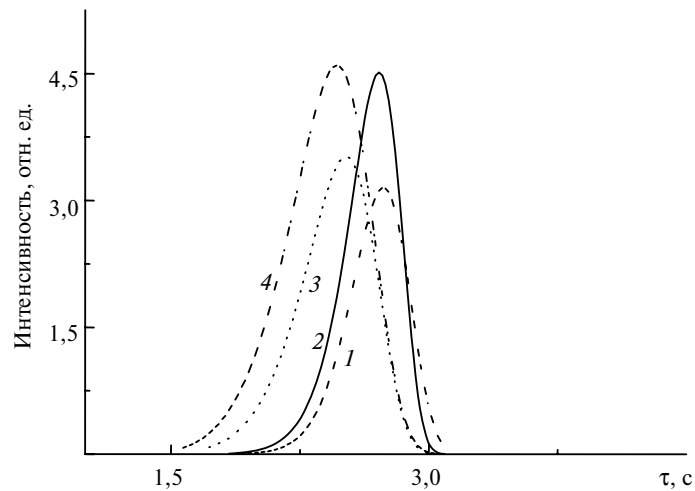


Рис. 5. Дифференциальные кинетические кривые удаления зондирующего растворителя из пор компакта порошка железа, полученного деформирующим протягиванием: исходный компакт (1), компакт после всестороннего растяжения (2), компакт после всестороннего растяжения с последующим всесторонним обжатием (3), компакт (3) после повторного растяжения (4).

Подробный анализ этих предположений далеко выходит за рамки данной статьи. Отметим два из них, которые можно сделать на основе представленных кинетических кривых зондирования. Это, во-первых, выраженный кооперативный характер смещений частиц в порошковых средах, сформированных протягиванием в замкнутом объеме. Во-вторых, это обратимость изменения состояния межчастичных контактов в образцах, полученных по упомянутой схеме уплотнения, в отличие от других схем. На качественном уровне изменения межчастичных контактов в образцах, полученных деформирующим протягиванием в замкнутом объеме (схема 2) и в образцах, полученных осевым прессованием (возможно, с последующим радиальным деформированием по схеме 1, т. е. в незамкнутом объеме) иллюстрирует упрощенная диаграмма (рис. 6).

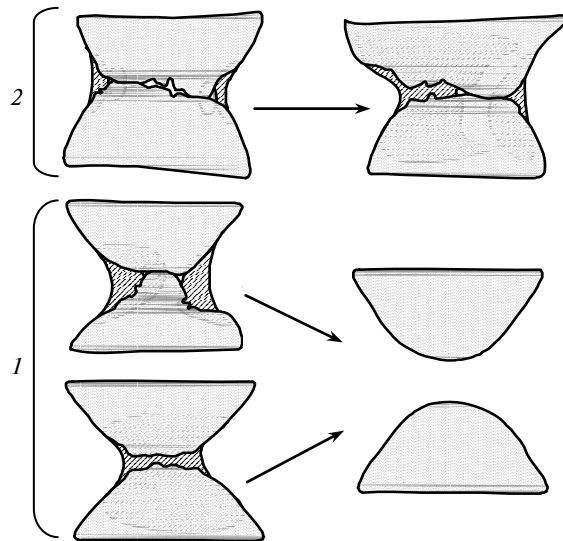


Рис. 6. Предполагаемый характер изменения строения межчастичных контактов в прессовках, полученных в открытой (1) и замкнутой (2) схемах деформирования.

Даже если ограничиться простейшими характеристиками, связанными с кинетическими кривыми зондирования порошковых сред, такими как площадь под кривой и положение максимума скорости зондирования, явно прослеживается их связь со структурой компакта. Выяснилось также, что динамические характеристики порового пространства порошковых тел чувствительны к изменениям, происходящим в материалах при механическом нагружении. Это проявляется как явление предразрушения, которое фиксируется по изменению формы кинетической кривой зондирования (рис. 7) [4]. Интересно, что существенное изменение динамических характеристик порового пространства происходит в порошковых материалах на стадии предразрушения до того, как сколько-нибудь заметным образом меняются его статические характеристики, т. е. традиционные показатели характерной формы и размеров пор. Можно сказать, что показатели кинетических кривых зондирования

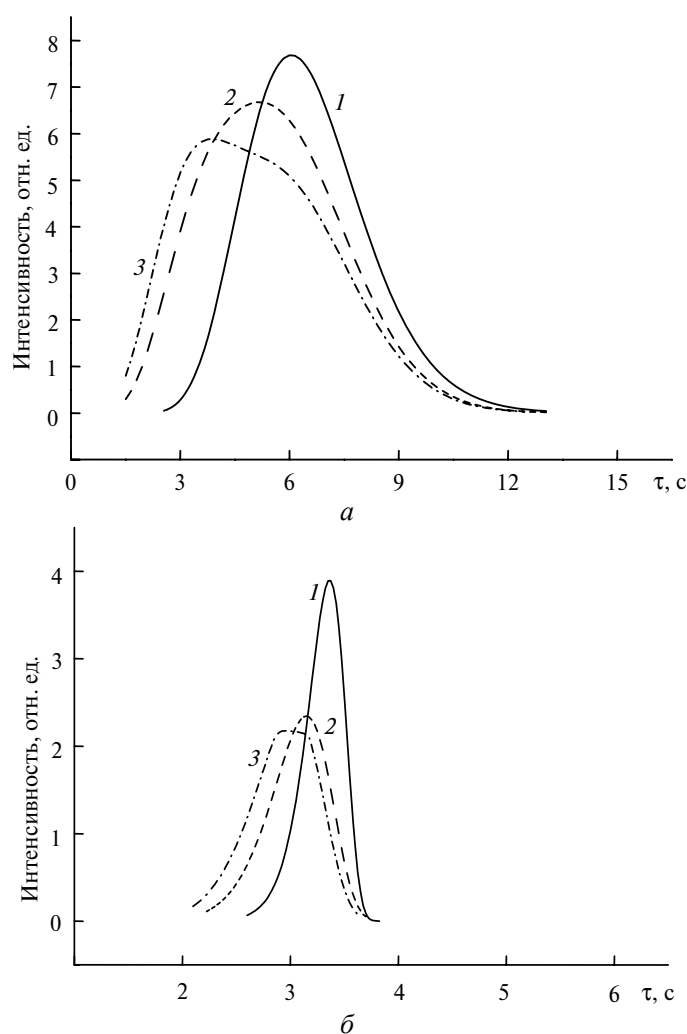


Рис. 7. Эволюция дифференциальной кинетической кривой зондирования приконтактного порового пространства в компактах порошка железа, полученных осевым прессованием (а) и деформирующим протягиванием в замкнутом объеме (б) под действием циклического нагружения с усилием меньшим разрушающего [4]: исходная кривая (1); образец после некоторого количества циклов нагружения (2); образец в состоянии предразрушения (3).

более чувствительны к величине накопленной деформации и реагируют на нее более плавно. Зависимость меры их изменения от количества рассеянной в порошковом теле энергии ближе к линейной, чем зависимость, например, параметров плотности распределения пор по размерам.

Еще одна важная особенность динамических характеристик порового пространства порошковых тел заключается в том, что их изменение на качественном уровне оценки происходит синхронно во всем объеме компакта, подвергнутого нагружению, в отличие от статических характеристик, явные изменения которых обычно локализованы в областях, подвергшихся наибольшему деформированию. Эту особенность можно трактовать следующим образом: динамические характеристики (например, особенности кинетических кривых зондирования) показывают как целое (т. е. весь образец, подвергающийся как целое некоторому нагружению) предопределяет поведение отдельных частей системы, а статические характеристики (показатели формы, размеров и пространственного распределения пор) — как совокупность взаимодействующих частей задает направление изменений в целом. Эти подходы дополняют друг друга и могут сочетаться при изучении эволюции строения и свойств порошковых сред в различных условиях.

Выводы

Характер эволюции структуры порошковых компактов в процессе их деформирования качественно изменяется при переходе к замкнутой схеме нагружения.

Топологические особенности порового пространства порошковых тел могут служить чувствительным индикатором трансформации структуры, связанной с изменением траектории их нагружения.

1. *Скороход В. В.* Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах // Порошк. металлургия. — 1995. — № 1/2. — С. 53—71.
2. *Штерн М. Б., Сердюк Г. Г., Максименко Л. А. и др.* Феноменологические теории пресования порошков. — Киев: Наук. думка, 1982. — 140 с.
3. *Розенберг О. А., Пащенко Е. А.* Исследование особенностей структуры порошковых сред, подвергнутых холодному ступенчатому пластическому деформированию // Сверхтв. материалы. — 2006. — № 6. — С. 68—79.
4. *Розенберг О. А., Пащенко Е. А.* К вопросу о строении и механизмах трансформации порового пространства порошковых тел, полученных с использованием различных схем уплотнения // Современные технологии в машиностроении. — Харьков: НТУ “ХПИ”, 2007. — С. 324—343.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины
Ин-т проблем материаловедения
им. И. Н. Францевича НАН Украины
Ун-т штата Калифорния

Поступила 06.03.08