

PACS: 81.40.Vw

Ю.Н. Подрезов, Д.Г. Вербило, Я.И. Евич

РОЛЬ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ КОНСОЛИДАЦИИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины
ул. Кржижановского, 3, г. Киев, 03142, Украина

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2013 года

Приведены результаты исследования механических свойств прессовок металлических порошков, испытанных на диаметрально сжатие и четырехточечный изгиб. Установлена линейная зависимость между прочностью прессовки и усилием прессования во всем диапазоне давлений. Существование такой связи объяснено в рамках модели индентирования, где приложенное усилие пропорционально площади контактного пятна. Совершенство контакта обеспечивается большими сдвиговыми деформациями в приконтактной зоне. Показано, что использование специальных схем уплотнения (разновалковая прокатка) активизирует сдвиговую деформацию и, как следствие, значительно увеличивает сырую прочность прессовок.

Ключевые слова: сдвиговая деформация, давление прессования, механические свойства, прессовки, металлические порошки

Наведено результати дослідження механічних властивостей пресовок металевих порошків, випробуваних на діаметральне стиснення й чотириточковий згин. Встановлено лінійну залежність між міцністю пресовки й зусиллям пресування у всьому діапазоні тисків. Існування такого зв'язку пояснено в рамках моделі індентування, де прикладене зусилля пропорціонально площі контактної плями. Досконалість контакту забезпечується великими зсувними деформаціями в приконтактній зоні. Показано, що використання спеціальних схем ущільнення (різновалкова прокатка) значно активізує зсувну деформацію і, як наслідок, значно збільшує сиру міцність пресовок.

Ключові слова: зсувна деформація, тиск пресування, механічні властивості, пресовки, металеві порошки

Введение

Вопрос контактообразования является одним из ключевых моментов создания качественных материалов и изделий порошковой металлургии. Важная составляющая решения этой общей задачи – исследование законов контактообразования на начальной стадии получения порошкового материала

для изготовления качественных прессовок в результате низкотемпературного уплотнения. Теоретический аспект решения данной проблемы предполагает создание физической теории контактообразования, а прикладной – разработку современных технологий «холодного прессования», позволяющих получать качественные прессовки.

Ввиду важности этой проблемы к настоящему моменту написано большое количество работ, посвященных анализу закономерностей формирования сырой прочности и установлению связи между технологическими параметрами уплотнения и свойствами прессовок [1–10]. Следует, однако, отметить, что большинство моделей носят феноменологический характер, а предлагаемые аналитические зависимости получены путем аппроксимации экспериментальных данных. В этом ряду позитивно выделяется ряд работ украинских ученых [2–7], где анализируются механизмы структурообразования и предлагаются конкретные технологические решения улучшения качества контактов прессовок. Это прежде всего относится к циклу работ, выполненному в научных школах Я.Е. Бейгельзимера и М.Б. Штерна [2–4], в которых обращается внимание на важную роль сдвиговых деформаций в процессе контактообразования и предлагается в качестве технологической схемы уплотнения использовать винтовую экструзию. Идеи, изложенные в этих статьях, приближают к пониманию физических явлений, ответственных за контактообразование. В предлагаемой работе предпринята попытка продвинуться в понимании данного вопроса на основании анализа влияния технологических параметров на прочность неспеченных заготовок пластичных металлических порошков.

Методика эксперимента

Поскольку в работе речь пойдет о прочности сырой прессовки, следует сказать несколько слов о технике эксперимента для определения этой характеристики. Учитывая малую технологичность неспеченных заготовок и сложности изготовления из них стандартных образцов для механических испытаний, исследователи обычно используют для определения сырой прочности бразильский тест [11–13]. Образец в виде цилиндра (спрессованной таблетки) укладывается на ребро и испытывается на сжатие до момента образования вертикальной трещины. Такая схема широко используется для исследования свойств грунтов и хрупких керамик, особенно для изделий малых размеров. Естественно, что вертикальная трещина в таблетке развивается вследствие действия растягивающих напряжений, возникающих в поперечном сечении таблетки и зависящих от коэффициента Пуассона. В случае металлических порошковых материалов использование такой методики проблематично по двум причинам. Во-первых, при испытании на сжатие металлов существует опасность, что в минимальном сечении образца начнется смятие его торцевых поверхностей. Во-вторых, ввиду того, что в пористых телах коэффициент Пуассона очень сильно зависит от пористости, а в высокопористых состояниях он приближается к нулю, значительно ус-

ложняется анализ влияния пористости (или усилия прессования) на прочность прессовок.

Исходя из вышесказанного, для определения прочности прессовок предлагаем проводить испытания на четырехточечный изгиб [14]. Это наиболее распространенная схема аттестации хрупких керамических и малопластичных металлических материалов. С ее помощью аттестуют модуль упругости E и разрушающее напряжение $\sigma_{\text{р}}$. Незначительная доработка программы обработки данных позволяет определять механические характеристики за пределами упругой области: предел упругости σ_{001} , предел текучести σ_{02} , предел прочности $\sigma_{\text{р}}$ и деформацию до разрушения $\varepsilon_{\text{рl}}$. Сравнительно простая форма образцов (балочки размером $5 \times 5 \times 45$ mm) позволяет достаточно просто аттестовать образцы и проводить сравнительный анализ механических свойств прессовок, полученных в разных условиях.

Сравнительные эксперименты, выполненные нами в работе [14] на титановых прессовках, демонстрируют хорошее воспроизведение результатов и чувствительность к структурным изменениям (рис. 1).

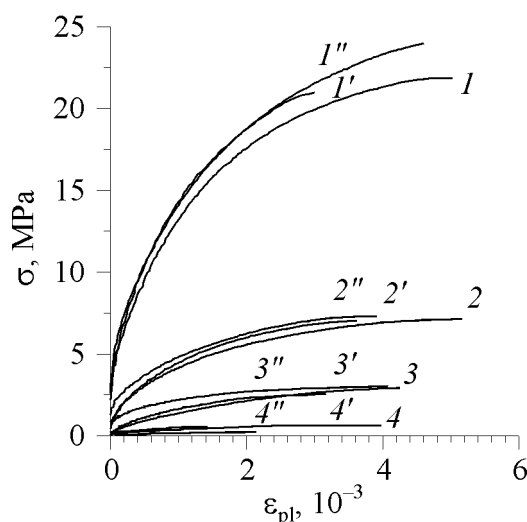


Рис. 1. Кривые деформационного упрочнения прессовок титана с разной пористостью, испытанных на четырехточечный изгиб: I, I', I'' – 10%; $2, 2', 2''$ – 20%; $3, 3', 3''$ – 30%; $4, 4', 4''$ – 40%

Сопоставление величины разрушающего напряжения, определенного по предложенной методике, с данными, полученными при испытаниях на бразильский тест (рис. 2), свидетельствует о том, что в последнем случае прочность оказывается завышенной для плотных состояний примерно в полтора раза, а с увеличением пористости эта разница увеличивается до 10 раз. Завышение абсолютных значений можно связать со смятием таблетки в ходе деформации, а увеличение разницы – со снижением коэффициента Пуассона с ростом пористости.

По нашему мнению, испытания на изгиб более адекватно характеризуют прочность прессовок и позволяют не только проводить сравнительный анализ по величине разрушающего напряжения, но сравнивать другие механические характеристики прессовок.

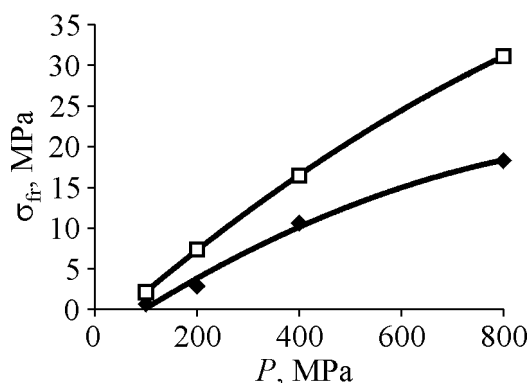


Рис. 2. Разрушающее напряжение заготовок порошкового титана, спрессованных разным усилием, определенное из испытаний на бразильский тест (□) и на четырехточечный изгиб (◆)

Результаты экспериментов

Результаты экспериментов по определению сырой прочности, как правило, обобщаются в виде зависимостей этой величины от плотности (пористости) прессовок или от удельного усилия прессования (отнесенного к единице площади прессовки) [1,6–10]. Зависимости сырой прочности от усилия прессования были впервые проанализированы М.Ю. Бальшиным в работе [1]. Аппроксимируя экспериментальные данные, автор показал, что прочность прессовок линейно зависит от усилия прессования на начальной стадии уплотнения. В то же время было обнаружено, что для плотных состояний линейная зависимость нарушается: экспериментальные значения прочности прессовок оказываются меньше. В дальнейшем такие зависимости многократно наблюдались другими авторами. На рис. 3,а приведены данные, полученные на железном порошке разных фракций [7], а на рис. 3,б –

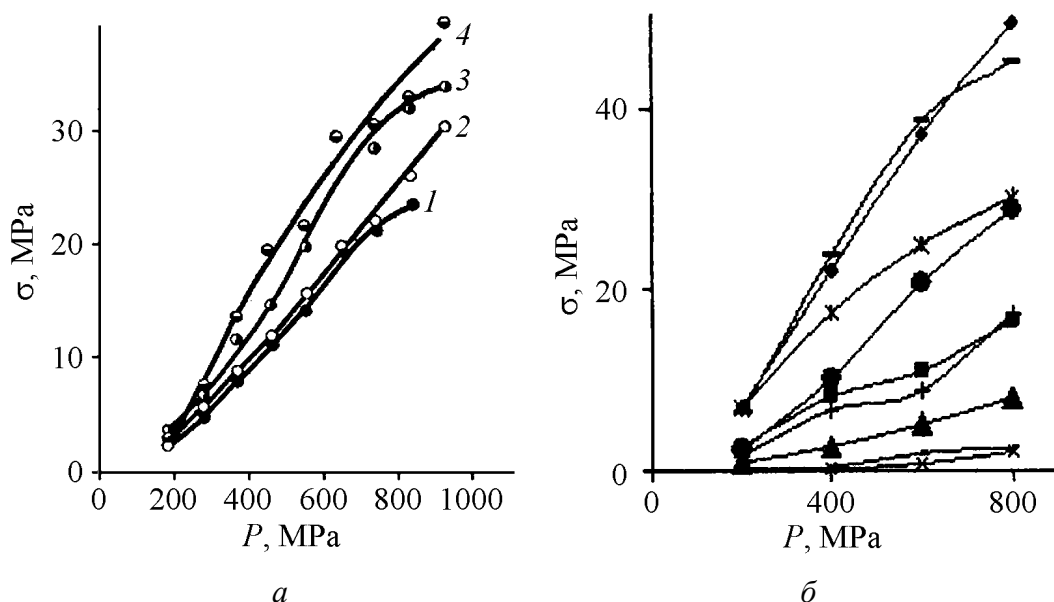


Рис. 3. Зависимость сырой прочности от давления прессования по данным: а – работы [7]: порошок железа: 1 – фракция +025, 2 – фракция –025 + 016, 3 – фракция –025 + 016, 4 – фракция –016 + 0063; б – работы [6]: ◆ – Ni_k, ■ – Ni_k + 40% Ni_{sint}, ▲ – Ni_k + 60% Ni_{sint}, × – Ni_k + 80% Ni_{sint}, * – Cu_{el}, ● – Ni_{el}, + – Mo, – – Cu₃P, — – Fe_{red}

на порошках никеля, меди, молибдена и железа [6]. Отметим, что в подавляющем большинстве экспериментов результаты получены с помощью бразильского теста, хотя в ряде случаев отдельные исследования проводились на растяжение на образцах сложной формы [9]. К сожалению, сложность эксперимента не позволяла осуществлять систематические исследования этим методом.

В работе [14] нами представлены результаты испытания прессовок титана с разной пористостью на четырехточечный изгиб по описанной выше методике. Учитывая информацию о кривой уплотняемости, представленную в [15], эти данные можно дополнить значениями усилия (напряжения) прессования (таблица).

Таблица

Свойства заготовок из титанового порошка, полученных прессованием, симметричной и асимметричной прокатками

Усилие прессования, МПа	θ , %	E , GPa	σ_{001}	σ_{02}	σ_{fr}	ϵ_{pl} , %
			МПа			
Холодное прессование						
800	10	4.9	6.9	15.9	18.3	0.47
400	20	3.3	3.3	8.0	10.6	0.63
200	30	0.79	1.0	2.33	2.55	0.45
100	40	0.31	0.4	0.66	0.67	0.3
Симметричная прокатка						
–	8	4.5	8.8	12.8	12.9	0.0023
Асимметричная прокатка						
–	5	44.2	109	–	116	0.0004

Зависимости модуля упругости, предела текучести и предела прочности от усилия прессования представлены на графиках рис. 4 соответственно.

Обращает на себя внимание, что все исследованные нами механические характеристики (модуль упругости, предел текучести и предел прочности) чувствительны к условиям прессования и демонстрируют зависимости, подобные представленным на рис. 1. Отметим, что каждый из перечисленных параметров важен для понимания процесса контактообразования и несет определенную смысловую нагрузку. Зависимость предела текучести от усилия прессования необходима для понимания физических явлений, поскольку вид кривой уплотняемости напрямую связан с законами упрочнения [15]. С практической точки зрения наиболее важно знать величину разрушающего напряжения. К тому же его величина количественно описывает формуемость материала [6]. В теории и практике порошковой металлургии модуль Юнга является фундаментальной характеристикой пористых тел в силу его чувствительности к морфологии порового пространства и нечувствительности к структуре твердой фазы [17].

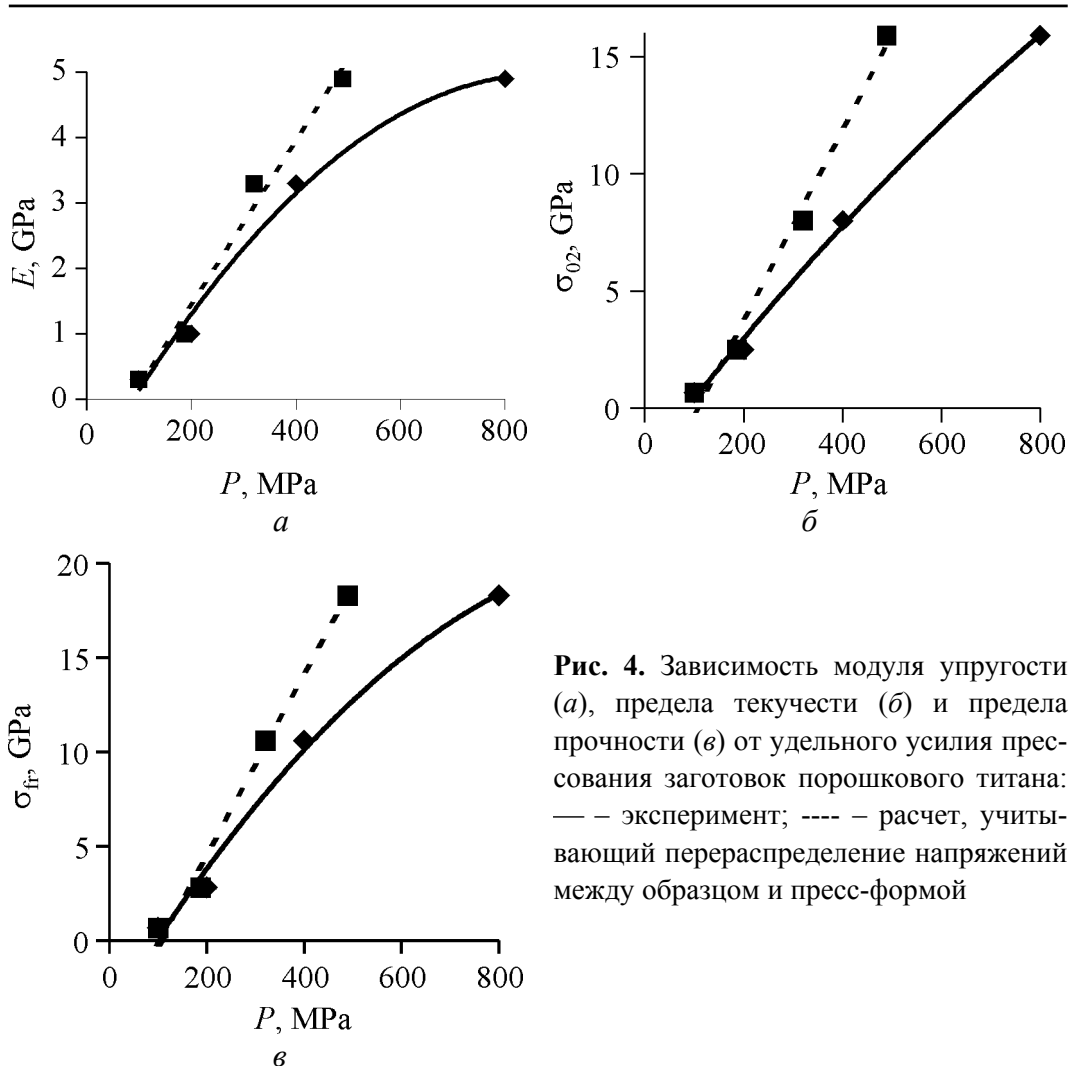


Рис. 4. Зависимость модуля упругости (а), предела текучести (б) и предела прочности (в) от удельного усилия прессования заготовок порошкового титана: — — эксперимент; ---- — расчет, учитывающий перераспределение напряжений между образцом и пресс-формой

Хотя визуально все представленные на рис. 4 зависимости демонстрируют сходный характер изменения, следует обратить внимание на некоторые различия, которые наиболее ярко видны при пересчете прочностных свойств в относительные единицы путем нормирования на величину, соответствующую свойствам наиболее плотной заготовки (рис. 5).

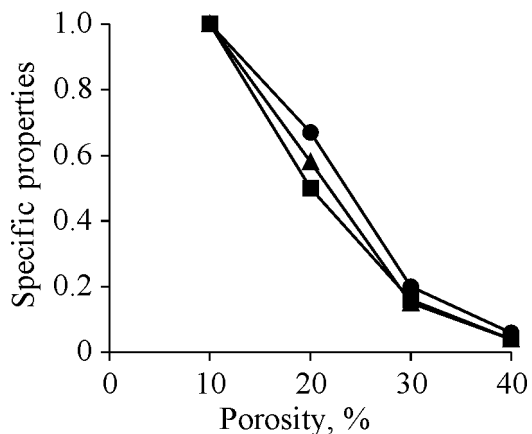


Рис. 5. Зависимость удельных механических свойств прессовок титана от пористости: ● — модуль упругости, ■ — предел текучести, ▲ — предел прочности

Анализ результатов пересчета показывает, что предел текучести и предел прочности изменяются с изменением усилия прессования примерно по одинаковому закону, тогда как модуль снижается несколько медленнее. При уплотнении прессовок от 40 до 10% предел текучести прессовок понижается в 30 раз, а модуль упругости – примерно в 20 раз. Это различие можно объяснить тем, что уплотнение до разной пористости ведет к разной пластической деформации прессовок и, следовательно, разному деформационному упрочнению твердой фазы. Из кривой упрочнения компактного титана можно заключить, что деформационное упрочнение плотных прессовок в 1.5 раза больше, чем пористых [15]. Близость абсолютных значений разрушающего напряжения и предела текучести и, соответственно, сходный характер изменения этих параметров при увеличении усилия прессования связаны с тем, что предельная деформация в неспеченных прессовках изменяется в пределах 0.3–0.5%. Следовательно, разрушение происходит почти на пределе текучести.

Обсуждение результатов

Среди феноменологических теорий контактообразования наибольшее распространение получили молекулярная, механическая и деформационно-физическая модели. Согласно первой теории формирование контакта связывают с возникновением между порошинками сил молекулярного взаимодействия (силы Ван-дер-Ваальса), согласно второй – прочность контактов контролируется механическим зацеплением порошинок. В третьем случае предполагается, что между порошинками возникает физический контакт, например, вследствие больших давлений и деформаций в областях шероховатостей порошинок. Для пластичных материалов вклад сил Ван-дер-Ваальса пренебрежимо мал (он не превышает 0.020 МПа). Влияние сил зацепления целесообразно учитывать лишь в порошках с разветвленной формой частиц (что не имеет места в наших экспериментах).

При разработке деформационной концепции контактообразования часто используется аналогия механического взаимодействия между порошинками с процессом индентирования [5]. Эта идея в нашем случае приобретает особый смысл, поскольку главное уравнение теории индентирования устанавливает линейную связь между приложенным усилием и площадью контакта. Такое соотношение хорошо коррелирует с соотношением Бальшина для малых и средних пористостей. Более того, линейную связь между усилием прессования и прочностными свойствами прессовок можно получить для всего исследованного диапазона, если учесть перераспределение усилия между пресс-формой и изделием.

Для введения этой поправки мы воспользовались развитыми в работе [15] представлениями о физической природе кривой уплотняемости порошкового тела, учитывающими деформационное упрочнение твердой фазы. Согласно [15] для получения расчетной кривой уплотняемости без учета вкла-

да трения пресс-формы необходимо знать истинную кривую упрочнения материала основы, степень пластической деформации порошковой прессовки (рассчитывается по величине начальной и конечной пористости) и зависимость предела текучести от пористости. Рассчитанные значения использованы для построения расчетных зависимостей на рис. 4,а–в (штриховые линии), из которых видно, что введение такой поправки позволяет получить линейную связь между усилием прессования и исследованными механическими характеристиками во всем диапазоне уплотнения. Очевидно, что подобным же образом эта поправка позволяет спрямить кривые, представленные на графиках рис. 3. Однако, поскольку необходимые параметры упрочнения для материалов, приведенных на графиках, отсутствуют, строго внести поправку в полученные результаты достаточно сложно.

Запишем главное уравнение теории индентирования [18] в виде линейной зависимости между усилием, действующим на индентор, P и квадратом диагонали отпечатка d^2

$$P = \frac{K_f d^2}{HV}, \quad (1)$$

где HV – твердость; K_f – коэффициент, зависящий от формы индентора (его величина увеличивается с повышением остроты индентора [19]). Из (1) следует, что при одинаковом усилии размер отпечатка тем больше, чем мягче материал и чем острее индентор. Такая же тенденция прослеживается при формировании сырой прочности прессовок. Согласно обобщающим данным, приведенным в монографии К.А. Гогаева и А.К. Радченко [6], при одинаковом усилии прессования прочность прессовок выше у более мягких материалов.

В теории порошковой металлургии неоднократно обсуждалось влияние фактора формы порошинок на сырую прочность прессовок [6]. Как правило, прочность прессовок повышается с увеличением шероховатости исходного порошка. В технологии уплотнения образцов с низкой прессуемостью часто используется операция размола порошинок правильной формы для придания им необходимой шероховатости [6]. Формально влияние фактора формы можно учесть коэффициентом K_f в (1), поскольку при заданном усилии прессования размер контактного пятна будет увеличиваться с повышением остроты контактирующих поверхностей.

Следует, однако, отметить, что для создания качественного физического контакта между порошинками важен не только размер контактного пятна, но и концентрация деформации в приконтактной зоне. Согласно теории индентирования величина средней деформации ε на контактной площадке индентор–материал определяется половиной угла при вершине индентора γ_1 и может быть рассчитана по формуле [19]:

$$\varepsilon = -\ln(\sin \gamma_1). \quad (2)$$

Из графика этой зависимости (рис. 6) видно, что сдвиговая деформация в приконтактной зоне резко увеличивается с повышением остроты индентора, достигая на острых углах величин $\varepsilon \sim 1$. Именно концентрация деформации на наиболее заостренных участках порошинок является причиной возникновения совершенных контактов. Следует особо обратить внимание на то, что в приповерхностных участках контактирующих поверхностей реализуется деформация сдвига. При вдавливании приповерхностные слои выступов сдвигаются вдоль приповерхностных слоев впадин, реализуя интенсивную сдвиговую деформацию большой величины. В наиболее деформированных участках достигается критическая степень деформации, достаточная для реализации когезии по механизму холодной сварки. Согласно [20] для реализации этого механизма степень деформации в области локализованного сдвига должна превосходить деформацию, необходимую для создания разориентированных границ деформационного происхождения, которые активизируют ротационный механизм структурообразования в области контактов. Обычно ее величина для разных материалов различна и изменяется в пределах $\varepsilon = 0.5-1.0$. При обычной схеме уплотнения таких участков достаточно мало, и, хотя в них достигается прочность, сопоставимая с прочностью компактного материала, суммарная прочность сырой прессовки сравнительно мала, о чем свидетельствуют результаты наших экспериментов.

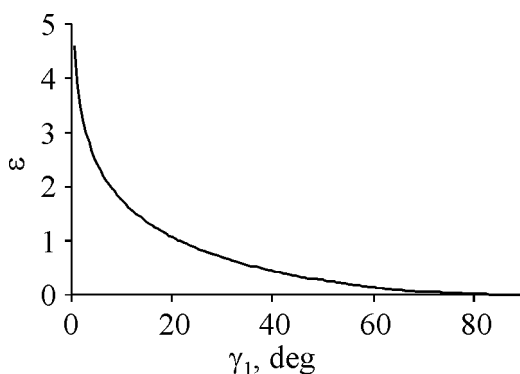


Рис. 6. Зависимость деформации ε контактной площадки индентор–материал от половины угла при вершине индентора γ_1

Использование специальных схем прессования, основанных на активации сдвиговых схем деформации (разновалковая прокатка), значительно увеличивает прочность прессовок. Кроме отмеченных ранее данных работ [2–4], обратим внимание на результаты [21], где по методике, описанной выше, нами исследовалась сырая прочность порошковых титановых лент, полученных методами традиционной и асимметричной прокатки. Из данных таблицы видно, что при асимметричной прокатке порошка благодаря активизации механизмов сдвиговой деформации в области контактирующих порошинок сырая прочность полосы и ее модуль упругости значительно выше, чем у прессовок, полученных по традиционной технологии, и практически на порядок выше, чем у аналогичной заготовки, полученной по технологии симметричной прокатки.

Выводы

1. Для определения прочности металлических порошковых материалов целесообразно использовать испытания на четырехточечный изгиб. Эта схема испытаний позволяет определять модуль упругости прессовки и механические характеристики за пределами упругой области: предел упругости, предел текучести, предел прочности и деформацию до разрушения.

2. Наблюдаемое отклонение от линейной зависимости прочности прессовок от усилия прессования при больших давлениях можно связать с перераспределением напряжений между образцом и пресс-формой. Учет этого явления в рамках концепции деформационного упрочнения твердой фазы пористого тела позволяет получить линейную зависимость для всей кривой уплотняемости.

3. Существование линейной связи между усилием прессования и прочностными характеристиками прессовок объясняется в рамках модели индентирования. В этом случае приложенное усилие пропорционально площади контактного пятна, а совершенство контакта обусловлено большими сдвиговыми деформациями, развиваемыми в приконтактной зоне.

4. Использование специальных схем прессования, основанных на активации сдвиговых схем деформации (разновалковая прокатка) позволяет значительно повысить прочность прессовок.

1. М.Ю. Бальшин, Порошковое металловедение, Металлургиздат, Москва (1948).
2. Я.Е. Бейгельзимер, О.В. Михайлов, А.С. Сынков, М.Б. Штерн, Е. Олевский, ФТВД **18**, № 1, 69 (2008).
3. Я.Е. Бейгельзимер, О.В. Михайлов, А.С. Сынков, М.Б. Штерн, ФТВД **18**, № 3, 92 (2008).
4. Я.Е. Бейгельзимер, М.Б. Штерн, Т.А. Епифанцева, А.С. Сынков, ФТВД **19**, № 3, 120 (2009).
5. В.В. Скороход, В.В. Покропивный, Когезия (адгезия, схватывание, сращивание, соединение, сваривание) межчастичных поверхностей и образование границ зерен в процессах спекания, возврата, рекристаллизации, сверхпластичности, трения и разрушения, Препринт 95-2, Институт проблем металловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев (1995).
6. К.А. Гогаев, А.К. Радченко, Формование порошковых систем, Ноулидж, Донецк (2011).
7. А.Ф. Жорняк, В.Е. Оликер, Порошковая металлургия № 7, 86 (1978).
8. В.И. Федосеев, Соппротивление материалов, Наука, Москва (1967).
9. В.К. Голубев, К.Г. Рабинович, Проблемы прочности № 6, 134 (1999).
10. I.H. Moon, K.H. Kim, Powder Met. **27**, № 2, 80 (1984).
11. А.И. Лурье, Теория упругости, Наука, Москва (1970).
12. В.Т. Головчан, Сверхтвердые материалы № 3, 34 (2009).
13. Ю.Н. Семенов, в кн.: Развитие методов формования изделий из порошков, ИПМ АН УССР, Киев (1976).

14. *Е.М. Борисовская, В.А. Назаренко, Ю.Н. Подрезов, О.С. Коряк, А.В. Вдовиченко, Я.И. Евич*, Порошковая металлургия № 9/10, 45 (2008).
15. *Е.М. Борисовская, В.А. Назаренко, Ю.Н. Подрезов, О.С. Коряк, В.Ф. Горбань, Я.И. Евич*, Порошковая металлургия № 7/8, 43 (2008).
16. *С.А. Фирстова, М. Шлесара*, Структура и прочность порошковых материалов, Наукова думка, Киев (1993).
17. *М.Ю. Бальшин*, Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна, Металлургия, Москва (1972).
18. *В.К. Григорович*, Твердость и микротвердость металлов, Наука, Москва (1976).
19. *Б.А. Галанов, Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова*, Сверхтвердые материалы № 3, 25 (1999).
20. *Г.В. Арнулис*, Совместная пластичная деформация разных металлов, Металлургия, Москва (1985).
21. *К.А. Гогаев, В.С. Воропаев, Г.Я. Калуцкий, Ю.Н. Подрезов, Д.Г. Вербило, О.С. Коряк*, Порошковая металлургия № 9/10, 11 (2012).

Yu.N. Podrezov, D.G. Verbilo, Ya.I. Yevich

THE ROLE OF SHEAR DEFORMATION IN CONSOLIDATION OF COMPACTED POWDER MATERIALS

Mechanical properties of compacted metallic powders have been investigated using diametric compression and four-bending test.

Experiments have shown that the strength of compacts, determined by the results of the Brazil test, is higher as compared with the data obtained from four-point bending. The paper proposes to use a four-point bending as the basic test for compacts. Besides information about raw strength of compacts, this test method allows obtaining additional information on the elastic modulus, tensile yield point and the amount of deformation before fracture in the case of testing of metallic compacts.

For compacts based on titanium metal tested by four-point bending, the linear relation between the strength of the compact and the stress of compacting was established in the whole pressure range.

The existence of such relation can be explained in the framework of indentation model, that uses applied force proportional to the square of contact. The accuracy of contact is controlled by high shear deformations in the near-contact zone. It is shown that the use of special packing schemes (rolling with rollers of different diameters) allows to promote shear deformation, and to increase the strength of the compacted materials.

Keywords: shear deformation, compacting pressure, mechanical properties, compacts, metallic powders

Fig. 1. Deformation strengthening of four-point bend tested titanium compacts of different porosity: 1, 1', 1'' – 10%; 2, 2', 2'' – 20%; 3, 3', 3'' – 30%; 4, 4', 4'' – 40%

Fig. 2. Breaking point of the powder titanium billets pressed with different loading that was evaluated by Brazil test (□) and by four-point bend test (◆)

Fig. 3. Compacting pressure dependence of green bond according to the data from: *a* – paper [7]: iron powder: 1 – fraction +025, 2 – fraction –025 + 016, 3 – fraction –025 + 016, 4 –

fraction $-016 + 0063$; δ – paper [6]: \blacklozenge – Ni_k , \blacksquare – $Ni_k + 40\% Ni_{sint}$, \blacktriangle – $Ni_k + + 60\% Ni_{sint}$, \times – $Ni_k + 80\% Ni_{sint}$, \ast – Cu_{el} , \bullet – Ni_{el} , $+$ – Mo , $-$ – Cu_3P , — – Fe_{red}

Fig. 4. Specific compression force dependence of the modulus of elasticity (a), yield limit (b) and strength limit (c) of the powder titanium billets: — – experiment; ---- – calculation with account of stress redistribution between the sample and the press die

Fig. 5. Porosity dependence of the specific mechanic properties of titanium compacts: \bullet – the modulus of elasticity, \blacksquare – yield limit, \blacktriangle – strength limit

Fig. 6. Strain ε of the indenter–material contact surface on the half-angle at the indenter top γ_1