

УДК 621.762

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПАКТОВ\***

© 2014 г. **А.М. Брагов<sup>1</sup>, А.Ю. Константинов<sup>2</sup>, Е.Е. Русин<sup>3</sup>,  
Е.Н. Разов<sup>3</sup>, М.С. Седов<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup>Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

<sup>3</sup>Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород

<sup>4</sup>Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

bragov@mech.unn.ru

*Поступила в редакцию 24.01.2014*

Представлены результаты исследования влияния температуры импульсного прессования на структуру и свойства компактов порошка восстановленного железа с добавлением нанопорошка карбида вольфрама. Показано, что увеличение температуры прессования приводит к повышению качества полученных компактов, формированию совершенной мелкозернистой структуры, росту значений плотности и микротвердости.

*Ключевые слова:* импульсное прессование, порошковые материалы, температура прессования, нанопорошки, структура.

Важнейшей стадией технологии изготовления компактных материалов является формирование качественных прессовок (компактов) заданной формы из порошков различного гранулометрического состава – крупнокристаллических порошков, нанопорошков и их композиций. Многие порошковые композиции, в состав которых входят нанопорошки, обладают уникальными физико-механическими свойствами и функциональными характеристиками. Наличие нанометровых и субмикронных структурных элементов в крупнокристаллическом порошке может привести к повышению трещиностойкости, ударной вязкости, износостойкости, прочности и твердости материала. В процессе компактирования должно быть обеспечено равномерное распределение плотности в компактах для последующего получения качественных изделий с заданными свойствами. Важно также обеспечить химическую чистоту и требуемый фазовый состав готовых изделий [1]. Следует отметить, что компактирование труднодеформируемых порошков и нанопорошков известными статическими методами практически невозможно. Поэтому для этих целей применяются динамические методы компактирования, которые отличаются сложностью и многообразием физических процессов, влияющих на деформацию отдельных час-

---

\* Выполнено при поддержке РФФИ (гранты 13-0197066\_Поволжье и 13-08-00862) и Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-593.2014.8).

тиц порошка и консолидацию пористой заготовки в целом. Вклад того или иного механизма в процессе уплотнения может быть различным в зависимости от материала прессуемого порошка, размера и формы его частиц, амплитуды, длительности импульса давления и температуры прессования.

Прочность компактных материалов при любом способе прессования находится в прямой зависимости от степени консолидации в областях межчастичных контактов. В порошковой металлургии степень консолидации, как правило, связывают с площадью обновленных поверхностей частиц порошка, которые образуются при их деформации в процессе прессования [2].

Как известно [3], импульсное нагружение пористых и порошковых систем сопровождается интенсивной пластической деформацией и локальным разогревом частиц материала. В случае металлических порошков обновленные поверхности из чистого металла (ювенильные поверхности) образуются в результате разрушения поверхностных слоев частиц при их деформации. Высокие температуры способствуют активации ювенильных поверхностей и формированию металлической связи в зоне контакта. Степень консолидации частиц порошка определяется температурой компактирования и рядом механических характеристик материала, таких, например, как упругие постоянные.

Целью настоящей работы является исследование влияния температуры компактирования на структуру и механические свойства компактов при фиксированных кинематических параметрах нагружения.

Для компактирования порошковых материалов была использована модификация метода Кольского [4], позволяющая контролировать параметры нагружения и выбирать рациональные режимы компактирования порошковых материалов при длительности импульсов нагружения в диапазоне 100–400 мкс с амплитудами давления до 2000 МПа.

Эксперименты проводились на установке, включающей в себя нагружающее устройство 1, два мерных стержня 3, 5 диаметром 20 мм каждый и комплекс регистрирующей и синхронизирующей аппаратуры (рис.1). В качестве нагружающего устройства использовалась газовая пушка калибром 20 мм. Исследуемый порошок находился в специальной обойме 4, размещенной между торцами мерных стержней. Импульс сжатия возбуждался ударом бойка 2 по левому стержню 3. Измерение деформаций производилось с помощью наклеенных на боковую поверхность стержней тензорезисторов 6. Сигналы от тензодатчиков регистрировали цифровым осциллографом TDS-2004B 7.

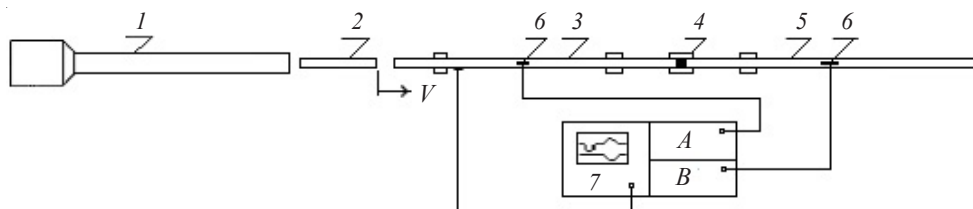


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования процессов импульсного компактирования порошковых материалов

Исследуемым материалом служил порошок восстановленного железа (средний размер частиц 8–10 мкм) с добавлением нанопорошка карбида вольфрама (WC) со средним размером частиц 25–30 нм. Массовая доля карбида вольфрама составляла

5% от общей массы. Смешивание порошков проводилось следующим образом. К смеси порошков (~ 40÷50 г) приливали ~ 80 г ацетона и обрабатывали суспензию ультразвуком в ультразвуковой ванне УЗВ-2,8 в течение 20 минут. Ацетон выпаривали с использованием вентилятора, а затем в сушильном шкафу при температуре 60 °С. Перед импульсным компактированием порошковый материал подвергался предварительному статическому сжатию. В таблице 1 приведены значения начальной плотности и плотности компактов после динамического компактирования.

Таблица 1

Образец	Температура предварит. нагрева, °С	Масса образца, г	Начальная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Плотность после компактирования, % (кг/м <sup>3</sup> )	Деформация, %
1	20	0,95	5048,10	85,04 (7032,83)	28,22
2	20	0,85	5246,27	86,43 (7147,83)	26,60
5	100	0,86	5209,01	87,73 (7255,40)	28,20
6	100	0,91	5242,98	89,07 (7366,31)	28,82
7	200	0,82	5001,70	92,34 (7637,01)	34,50
8	200	0,83	5299,05	93,14 (7702,54)	31,20
3	300	0,96	5353,02	94,26 (7795,34)	31,33
4	300	0,79	5250,06	95,47 (7895,28)	33,50

Плотность определялась путем измерения массы и объема компакта. Объем вычислялся методом гидростатического взвешивания.

Для оценки качества полученных компактов были проведены металлографические исследования. Исследование микрорельефа поверхности и поперечного сечения компактов проводилось методом сканирующей электронной микроскопии на электронном микроскопе TESCAN VEGA II. Рентгеновский микроанализ в режиме сканирования по линии поверхности и поперечных шлифов полученных компактов проводился на энергодисперсионном спектрометре INCA Energy 250. Измерения микротвердости проводили на приборе ПМТ-3.

Импульсное прессование проводилось в одинаковых условиях нагружения (длительность импульса давления ~350 мкс, амплитуда ~1500 МПа) при температурах 20, 100, 200 и 300 °С. Нагрев обоймы с порошком проводился с использованием специального нагревательного устройства. Время нагрева порошка перед процессом компактирования составляло: до температуры 100 °С – 10÷15 минут, до температуры 200 °С – 15÷25 минут, до температуры 300 °С – 25÷35 минут.

В каждом эксперименте регистрировались кинематические параметры нагружения, температура и импульсы деформаций в мерных стержнях, по которым строились диаграммы динамического прессования исследуемого порошка (рис. 2).

Полученные компакты обладали достаточно однородной мелкозернистой структурой. Общая картина распределения пор равномерная, форма пор, в основном, близка к сферической. Проведенные исследования показали, что увеличение температуры прессования приводит к росту плотности компактов. Максимальная плотность компакта достигала ~ 93% при температуре прессования 300 °С, а минимальная плотность ~ 85% наблюдалась у компакта, полученного при температуре 20 °С.

На рис. 3 представлена зависимость плотности порошкового материала (Fe + 5% WC) от температуры прессования.

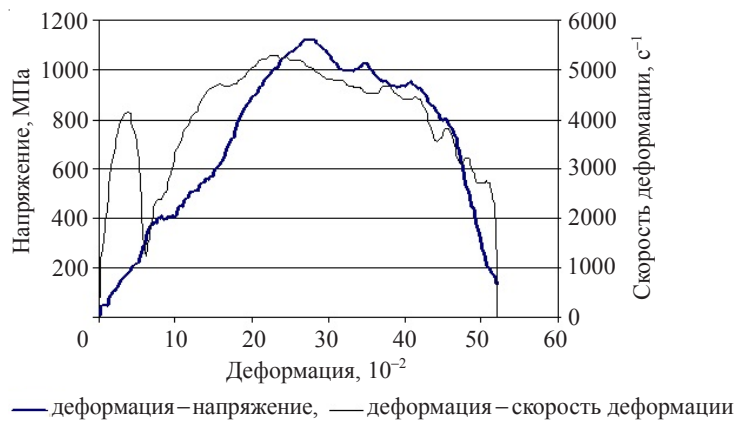


Рис. 2. Типичная диаграмма прессования порошка

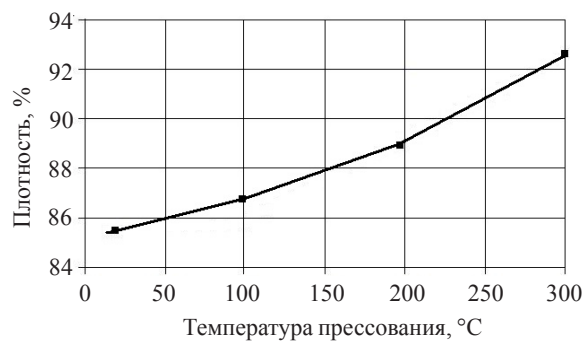


Рис. 3. Зависимость плотности порошкового материала от температуры прессования

На рис. 4–7 представлены микрофотографии структуры поверхности компактов, полученных из порошка железа с добавлением 5% нанопорошка WC при температурах прессования 20, 100, 200 и 300 °С. Рентгеновский микроанализ в режиме сканирования по линии поверхности компакта показал, что нанопорошок WC равномерно распределен по границам частиц порошка железа.

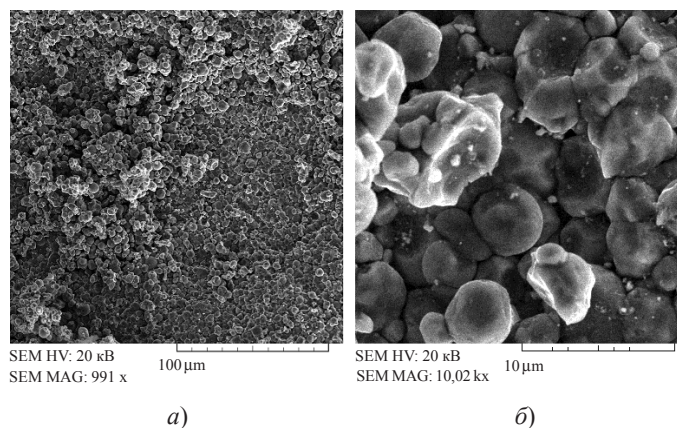


Рис. 4. Структура поверхности компакта: а – увеличение в 1000 раз, б – увеличение в 10000 раз. Температура прессования 20 °С

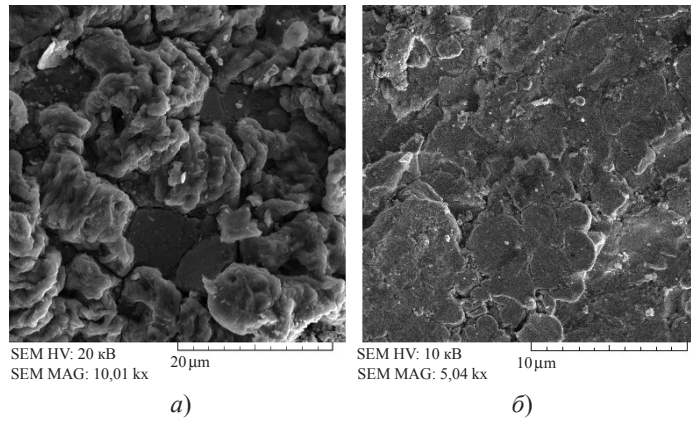


Рис. 5. Структура поверхности компакта: *a* – увеличение в 5000 раз, *б* – увеличение в 10000 раз. Температура прессования 100 °С

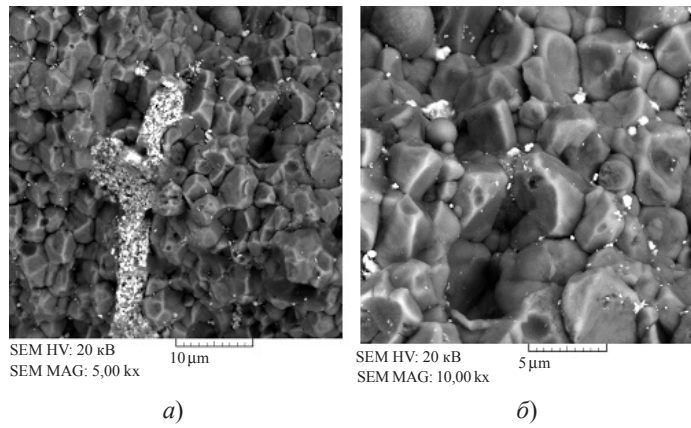


Рис. 6. Структура поверхности компакта: *a* – увеличение в 5000 раз, *б* – увеличение в 10000 раз. Температура прессования 200 °С

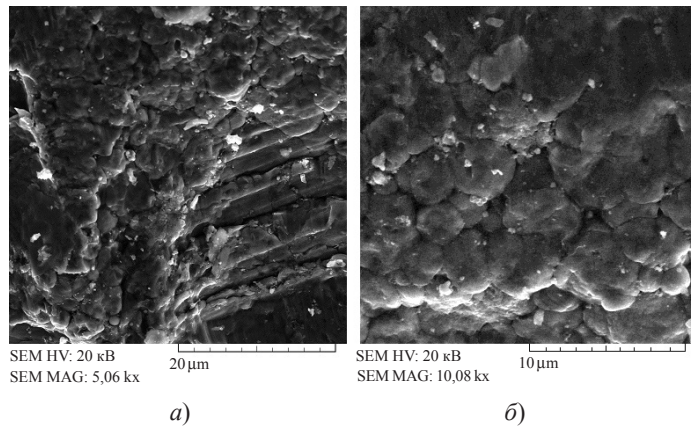


Рис. 7. Структура поверхности компакта: *a* – увеличение в 5000 раз, *б* – увеличение в 10000 раз. Температура прессования 300 °С

Обсудим полученные результаты. Известно, что уплотнение порошка под действием приложенной нагрузки реализуется как за счет взаимного перемещения ча-



стиц порошковой смеси, так и за счет пластической деформации частиц порошка. На начальной стадии прессования порошковой смеси наибольший вклад в уплотнение дает взаимное перемещение частиц и заполнение мелкими частицами промежутков между крупными. На завершающей стадии процесса прессования уплотнение происходит, в основном, за счет пластической деформации частиц. Далее происходит «заклинивание» порошковой смеси и исчерпание пластичности частиц порошковых материалов. Независимо от дальнейшего роста приложенной нагрузки достигается пороговая плотность порошкового тела, последующее увеличение которой невозможно без изменения физических свойств материала частиц формуемой среды (например, путем предварительного нагрева). Поэтому предварительный нагрев позволяет дополнительно увеличить плотность за счет дальнейшего перемещения частиц.

Металлографический анализ полученных компактов показал, что в структуре компактов имеются зоны с локальными повышенными температурами, расположенные вдоль границ частиц, в местах затекания пор. На рис. 5–7 хорошо заметны достаточно крупные частицы, образовавшиеся в результате объединения мелких зерен. Кроме того, видны места объединения зерен между собой и отчетливо видны зоны локального тепловыделения, обусловленные скольжением частиц относительно друг друга. Также по микрофотографиям структур компактов можно утверждать, что температуры контактов частиц и появление связей между ними зависят, в том числе, и от характера их деформирования.

Судя по остаточным деформациям частиц порошка, основная часть тепловой энергии, возникающей вследствие пластической деформации, запасается в мелкой фракции. Механизм явления может состоять в том, что при контакте частиц разного радиуса большие напряжения в процессе нагружения первоначально возникают на частицах меньшего радиуса. Это приводит к их пластическому течению, разогреву и дальнейшему ослаблению. Важность локальных процессов тепловыделения при импульсной обработке порошковых материалов с точки зрения получения прочных компактов в настоящее время является общепризнанной. Процессы тепловыделения, в свою очередь, определяются размером фракций частиц, начальной температурой, плотностью, термодинамическими характеристиками материалов и условиями импульсного нагружения. Анализ структур полученных компактов показал, что предварительный нагрев порошкового материала приводит к более однородному выделению энергии по поверхности частиц. Проведенные исследования также показали, что увеличение температуры предварительного нагрева порошка приводит к росту микротвердости (рис. 8).

Микротвердость и плотность в центральной области компактов выше, чем в зоне сопряжения пуансона со стенкой матрицы. На рис. 9 в качестве примера приведен график зависимости изменения микротвердости поверхности компакта (образец №4) по диаметру образца.

Градиенты напряжений в процессе формования приводят к различной деформации и изменению плотности внутри прессуемого порошкового компакта. Это, в свою очередь, связано с трением порошка о стенки обоймы, межчастичным трением и давлением прессования. При импульсном прессовании при температурах 20, 100, 200, 300 °С характер распределения микротвердости и плотности по объему компакта остается одинаковым.

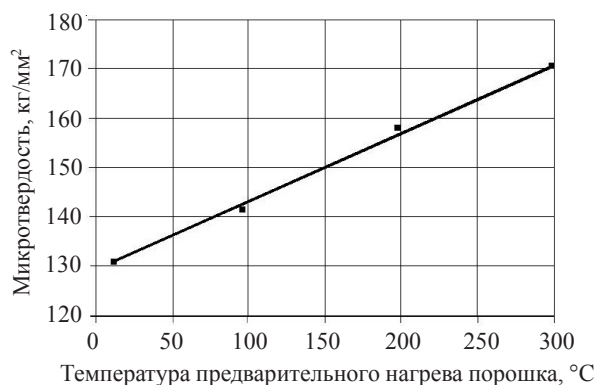


Рис. 8. Зависимость микротвердости поверхности компактов от температуры прессования

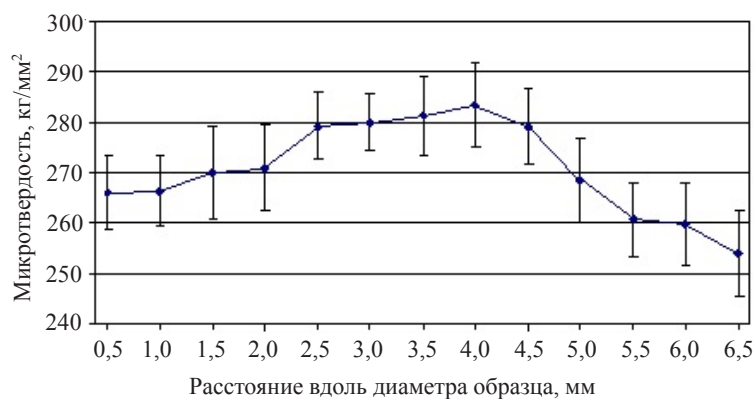


Рис. 9. Распределение микротвердости поверхности компактов по диаметру образца №4 (300 °С)

## Выводы

1. Установлено, что увеличение температуры предварительного нагрева порошка приводит к увеличению плотности и микротвердости компакта.
2. Проведенные металлографические исследования структуры полученных компактов показали, что увеличение температуры предварительного нагрева приводит к формированию более совершенной мелкозернистой структуры за счет увеличения площади ювенильной поверхности. Увеличение температуры прессования способствует активации ювенильных поверхностей и формированию металлической связи в зоне контакта частиц порошка.

### Список литературы

1. Высокоскоростные способы прессования деталей из порошковых материалов / К.Н. Богоявленский, П.А. Кузнецов, К.К. Мартенс и др. Л.: Машиностроение, 1984. 168 с.
2. Шепельский Н.В., Корнилов В.Н., Белокопытов В.И. Аналитическое прогнозирование анизотропии сопротивления разрушению прессовок из сферических порошков // Порошковая металлургия. 1990. №1. С. 62–65.
3. Raybould D. The production of strong parts and non-equilibrium alloys by dynamic compaction // Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals. New York and London: Plenum Press, 1981. P. 895–911.
4. Брагов А.М., Родионов С.Н., Русин Е.Е. Использование метода Кольского для

исследования процессов импульсного прессования порошковых материалов // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30, вып. 21. С. 10-15.

**THE EFFECT OF THE DYNAMIC COMPRESSION TEMPERATURE  
ON THE STRUCTURE AND MECHANIC PROPERTIES OF COMPACTS**

**A.M. Bragov, A.Yu. Konstantinov, E.E. Rusin, E.N. Razov, M.S. Sedov**

The results of studies of the effect of pulse compression temperature on the structure and properties of the reduced iron powder compacts with the addition of tungsten carbide nanopowder. It is shown that an increase in temperature leads to an increase in compression quality obtained compacts, forming a perfect fine-grain structure, increased density and microhardness.

*Keywords:* pulse compression, powder materials, pressing temperature, nanopowders, structure.