

конф., Минск, 9–11 сент. 2020 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.] ; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 338–343.

8. *Морфология* и структура композиционных порошков железо – алмаз, полученных в условиях интенсивной механической активации / П. А. Витязь [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. – 2016. – Вып. 5. – С. 336–340.

9. *Структура* и свойства композиционного ферроабразивного порошка для магнитно-абразивной обработки, полученного методом СВС / Т. Л. Талако [и др.] // Порошковая металлургия : респ. межвед. сб. науч. тр. – 2016. – Вып. 39. – С. 120–128.

## **УДАРНО-ВОЛНОВАЯ АКТИВАЦИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ КОМПАКТИРОВАНИИ ПОРОШКОВ**

**Л. В. Судник<sup>1</sup>, А. Ф. Ильющенко<sup>2</sup>, А. Р. Лученок<sup>1</sup>,  
К. Ф. Рудницкий<sup>1</sup>, В. С. Ткачук<sup>1</sup>, А. В. Семченко<sup>3</sup>,  
Н. В. Гапоненко<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*ОХП «Научно-исследовательский институт импульсных процессов  
с опытным производством», г. Минск, Беларусь,  
e-mail: [impuls@bn.by](mailto:impuls@bn.by)*

<sup>2</sup>*Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа,  
г. Минск, Беларусь, e-mail: [brmc@tut.by](mailto:brmc@tut.by)*

<sup>3</sup>*Гомельский государственный университет имени  
Франциска Скорины, г. Гомель, Беларусь*

<sup>4</sup>*Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь,  
e-mail: [gaпоненko@bsuir.by](mailto:gaпоненko@bsuir.by)*

**Введение.** Перспективными и быстроразвивающимися способами получения изделий из порошковых материалов являются взрывное прессование и ударно-волновая активация.

В настоящее время процессы импульсного прессования используются главным образом при получении материалов и изделий специального назначения из трудно прессуемых порошков и разнородных композиций, для проведения синтеза новых мате-

риалов, а также, когда исходные порошки имеют уникальные свойства (например, аморфные и нанокристаллические порошки), которые могут быть реализованы только на плотных компактах, полученных с использованием методов импульсного прессования.

### **Экспериментальные данные и обсуждение результатов.**

Взрывные технологии основаны на физико-химических и физико-механических процессах, протекающих в веществе под действием ударных волн. Ударные волны генерируются либо при детонации конденсированного взрывчатого вещества (ВВ), находящегося в контакте с исходным материалом, либо при столкновении с ним ударника, разгоняемого до высоких скоростей продуктами детонации. В обоих случаях в материалах развивается высокое давление (до 10 ГПа), многократно превышающее их динамические пределы текучести, которое распространяется по веществу с высокой скоростью (скорость нагружения – 200–800 м/с и выше).

С целью выяснения влияния интенсивности предварительной ударно-волновой обработки на поведение прессовок из порошков тугоплавких соединений и сопоставления этих результатов с данными по спекаемости проводили исследования технологических параметров и тонкой структуры порошка вольфрама, обработанного ударными волнами различной интенсивности.

В качестве модельного материала для проведения исследований выбрали порошок вольфрама марки ПВЧТУ 48-19-57-91 со средним размером частиц 5 мкм.

На протекание фазовых превращений и активационных процессов под действием ударных волн большое влияние оказывает соотношение длительности импульса давления и времени усреднения температуры по объему частиц порошка [1–4].

Большое количество переменных, используемых в реальных процессах прессования (вид ВВ, высота заряда, толщина пуансона и основания, забойка заряда ВВ) значительно осложняют расчет параметров амплитуды и длительности ударно-волнового воздействия.

Поэтому нами использована приближенная оценка энергосиловых параметров импульсного нагружения, описываемая без-

размерными величинами, показывающими относительную величину интенсивности ударно-волнового воздействия на вещество (сила ударной волны  $r$ ), например, безразмерный параметр ( $r$ ) [5]:

$$r = \frac{\rho_{\text{ВВ}} H_{\text{ВВ}}}{\rho_{\text{пор}} H_{\text{пор}}},$$

где  $r$  – безразмерный параметр;  $\rho_{\text{ВВ}}$  и  $\rho_{\text{пор}}$  – плотность взрывчатого вещества и порошкового тела соответственно;  $H_{\text{ВВ}}$  и  $H_{\text{пор}}$  – высота заряда взрывчатого вещества и прессуемого порошка соответственно.

Параметр  $r$  характеризует подобие полей давления по всему объему материала на фронте ударной волны, что позволяет эффективно оценивать интенсивность ударно-волновых процессов в таких многокомпонентных материалах, как пористые среды.

Порошок вольфрама нагружали по плоской схеме с линейным фронтом детонации (рис. 1) зарядом ВВ аммонит № 6 ЖВ со скоростью детонации около 4000 м/с при величине безразмерного параметра  $r = 0,5-3,0$ . Инициирование заряда ВВ производили электродетонатором 6.

Результаты исследований приведены на рис. 2–5.

Для порошка вольфрама после взрывной обработки отмечают сильный рост удельной поверхности (см. рис. 2), значительные

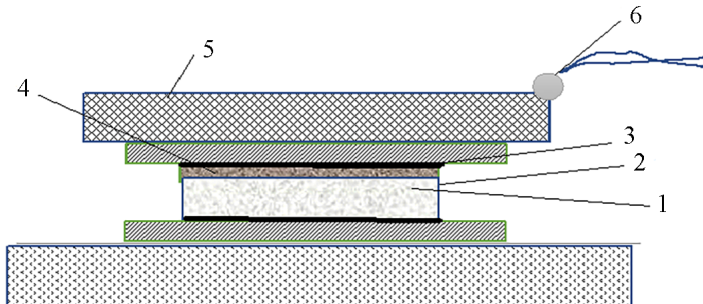


Рис. 1. Схема импульсного прессования: 1 – порошок вольфрама; 2 – оснстка для взрывного прессования; 3 – промежуточный пуансон; 4 – прокладка; 5 – заряд взрывчатого вещества аммонит № 6 ЖВ; 6 – электродетонатор

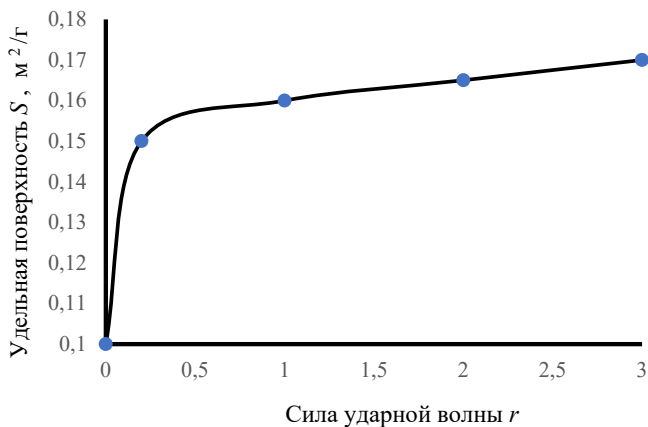


Рис. 2. Зависимость удельной поверхности порошка вольфрама от силы ударной волны

изменения насыпной массы и массы утряски (см. рис. 3). Отмечен рост истинного физического уширения линий  $\beta(200)$ . Причем максимальные изменения свойств порошка наблюдаются при величине безразмерного параметра  $r = 0,2$ . При повышении значения параметра  $r = 1,0-3,0$  величина изменений свойств замедляется.

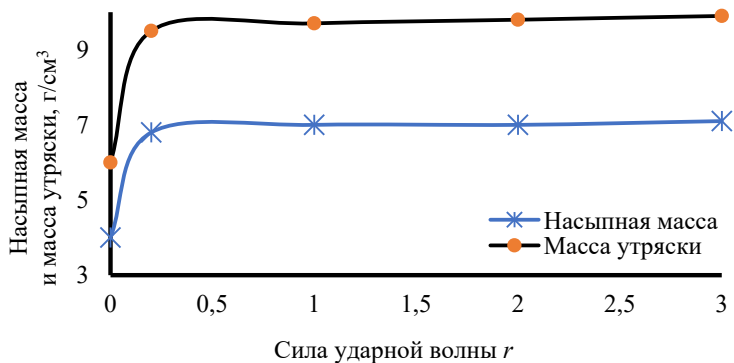


Рис. 3. Зависимость насыпной массы и массы утряски порошка вольфрама от силы ударной волны

Наблюдается рост относительной плотности спеченных прессовок из порошка вольфрама при увеличении интенсивности предварительной ударно-волновой обработки (рис. 5).

Изменения на поверхностях частиц порошка при прессовании обусловлены пластической деформацией, трением, повышением температуры и химическим взаимодействием.

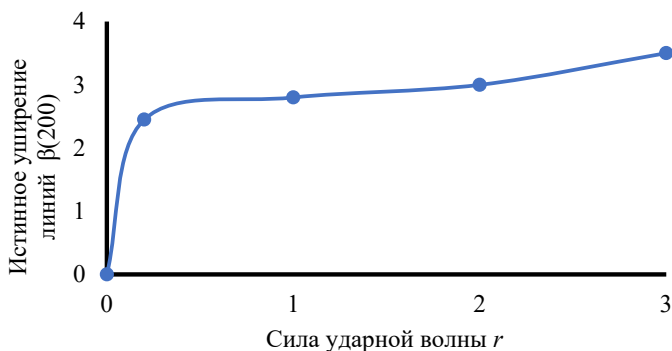


Рис. 4. Зависимость истинного уширения линий  $\beta(200)$  от силы ударной волны

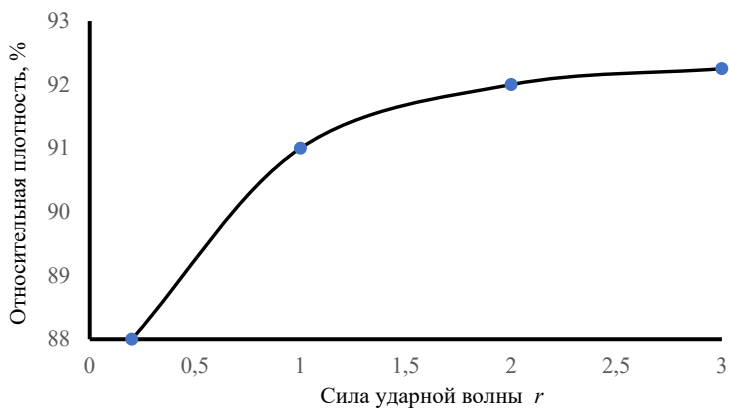


Рис. 5. Характер влияния интенсивности предварительной ударно-волновой обработки на изменение относительной плотности спеченных при температуре 1600 °С прессовок из порошка вольфрама

Для процесса спекания важны также поверхностные и объемные макро- и микродефекты упаковки. Можно ожидать, что поверхностные дефекты в какой-то мере характеризуются величиной удельной поверхности, а объемные – отклонением пикнометрической плотности от рентгеновской.

Активационные процессы при импульсном нагружении тугоплавких порошков оказывают доминирующее влияние на свойства прессовок и последующее поведение прессовок при спекании [6–10]. Возникновение на границе раздела частиц порошка метастабильных областей, представляющих собой граничные слои повышенной дефектности, насыщенные материалом соседней частицы, легко релаксируют при нагреве, что приводит к значительному увеличению подвижности атомов и снижению температуры спекания. Отжиг дефектов, а также процесс спекания

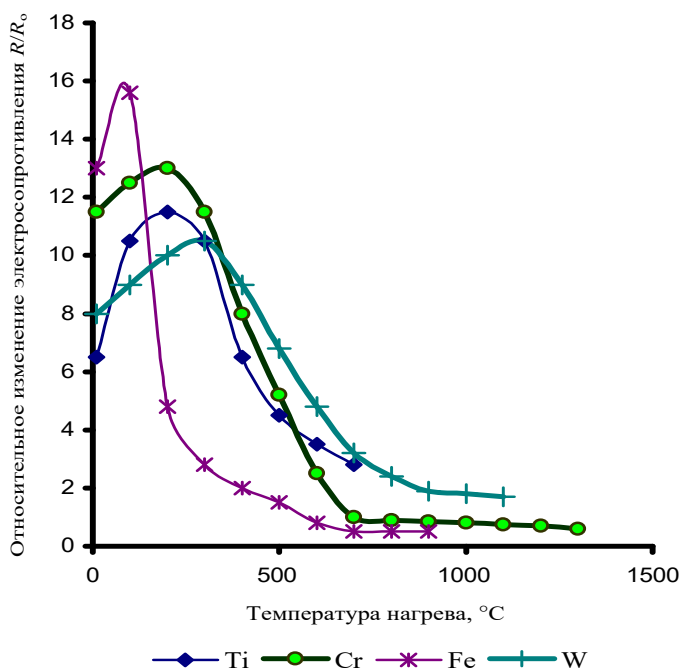


Рис. 6. Зависимость электросопротивления от температуры нагрева

начинаются при довольно низких температурах, о чем косвенно свидетельствуют данные изменения электросопротивления прессопок при нагреве (рис. 6).

Аналогичная зависимость изменения электросопротивления наблюдается и для прессопок из порошков титана, хрома, железа.

В результате ускорения диффузионных процессов плотность при спекании активированных взрывом порошков значительно повышается с одновременным снижением температуры спекания до 400–500 °С и заметным улучшением свойств спеченных изделий.

На микроскопическом уровне ударно-волновое воздействие сопровождается быстрой эволюцией структуры. Наблюдается сильная деформация зерен (текстурирование), их дробление и образование большого числа дефектов атомно-кристаллического строения, а также динамическая рекристаллизация, способная измельчить структуру до субмикронного уровня, что приводит к совершенно новым физико-механическим свойствам материала.

**Заключение.** Резюмируя изложенное, отметим, что в ходе импульсного компактирования порошков протекает ряд процессов, приводящих к ускорению диффузионных процессов при последующем спекании, что объясняет снижение температур спекания. На примере порошка вольфрама показано существование оптимальной области режимов ударно-волнового нагружения, при которых достигается максимальная активация исходных порошков.

## Литература

1. *Термодинамика* и кинетика образования  $MSi_2$  в условиях ударного сжатия / С. С. Бацанов [и др.] // Журнал неорганической химии. – 1997. – Т. 42, № 1. – С. 110–117.
2. *Ferreira, M. A.* Dynamic compaction of titanium aluminides by explosively generated shock waves: microstructure and mechanical properties / M. A. Ferreira, N. N. Meyers, S. N. Thadhani // Metallurgical Transactions. – 1992. – Vol. 23A. – P. 3251–3261.
3. *Бондарь, М. П.* Компактирование взрывом: тип микроструктуры контактных границ, созданный при образовании прочной связи / М. П. Бондарь // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 4. – С. 131–140.

4. Prummer, R. Explosive compaction of powders – state of art / R. Prummer // IX Int. Conf. HERE, Novosibirsk, August, 18–22, 1986. – Novosibirsk, 1986. – P. 169–176.

5. Особенности подготовки исходных порошков для импульсного компактирования распыляемых мишеней из тугоплавких металлов / Л. В. Судник [и др.] // Электromеталлургия. – 2021. – № 12. – С. 2–9.

6. Гегузин, Я. Е. Физика спекания : учеб. пособие для ВУЗов / Я. Е. Гегузин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1984. – С. 302–311.

7. Eakins, D. Discrete particle simulation of shock wave propagation in a binary Ni + Al powder mixture / D. Eakins, N. N. Thadhani // Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 101 (200). – P. 684–688.

8. Эпштейн, Г. Н. Структура металлов деформированных взрывом / Г. Н. Эпштейн. – М. : Металлургия, 1980. – 256 с.

9. Бацанов, С. С. Неорганическая химия высоких динамических давлений / С. С. Бацанов // Успехи химии. – 1986. – Т. LV, вып. 4. – С. 579–607.

10. Ададунов Г. А. Ударное сжатие малоэластичных конденсированных веществ при низких начальных температурах / Г. А. Ададунов // Химия высоких энергий. – 1973. – Т. 6, № 6. – С. 554–555.

## СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ СИЛИЦИДА ТИТАНА

**О. М. Чернаусик, М. В. Тумилович, Д. А. Котов**

*Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь,  
e-mail: o.chernausik@bsuir.by*

**Введение.** Внимание к наноструктурированным (построенным из отдельных наноразмерных объектов, но не превышающих суммарный размер 100 нм) наноразмерным порошкам силицида титана вызвано как фундаментальным научным интересом к нанокристаллитам силицидов титана, так и возможностями их практического применения. Так, в последнее время исследователи всего мира прилагают большие усилия для создания новых фотокатализаторов на основе силицидов титана под разложение воды при синтезе водорода и кислорода.

Уникальные свойства наноструктурированных наноразмерных порошков, такие как высокие значения величины удельной