

УДК 621.7.9.044

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ P6M5

**А. В. Алифанов<sup>1</sup>, И. А. Богданович<sup>2</sup>, Ю. И. Кривонос<sup>3</sup>,  
В. В. Малеронок<sup>4</sup>, А. М. Милюкова<sup>5</sup>, О. А. Толкачева<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> Лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и технологий, д. т. н., профессор, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроения Барановичского государственного университета, г. Барановичи, Республика Беларусь, e-mail: alifanov\_aav@mail.ru

<sup>2</sup> К. т. н., доцент, заведующий кафедрой технологии и оборудования машиностроения Барановичского государственного университета, г. Барановичи, Республика Беларусь, e-mail: irinabogdanovich1@rambler.ru

<sup>3</sup> Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Республика Беларусь

<sup>4</sup> Майор, преподаватель кафедры беспилотных авиационных комплексов и боевого управления военного факультета в учреждении образования «Белорусская государственная академия авиации», г. Минск, Республика Беларусь

<sup>5</sup> Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Республика Беларусь

<sup>6</sup> Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Республика Беларусь

### Реферат

Проведены исследования по изучению процесса высоковольтного электроразрядного спекания порошка быстрорежущей стали P6M5. Процесс высоковольтного электроразрядного спекания порошков сопровождается комплексом электрофизических, термодинамических и механических явлений, оказывающих влияние на процессы спекания образцов и их свойства.

Установлено, что процесс высоковольтного электроразрядного спекания порошков стали P6M5 сопровождается уплотнением порошка в результате спекания частиц, а также действием на образец из порошка сжимающих напряжений. Большое влияние на процесс высоковольтного электроразрядного спекания оказывают форма и размер частиц, характер поверхностных пленок, размер и форма матрицы.

К факторам, влияющим на прочностные свойства образцов, относятся гранулометрический состав порошка, его исходное электросопротивление, а также технологические параметры обработки, такие как энергия разряда и плотность разрядного тока.

**Ключевые слова:** порошок, сталь P6M5, высоковольтное электроразрядное спекание, прочность образца.

## RESEARCH OF THE PROCESS OF HIGH VOLTAGE ELECTRIC DISCHARGE SINTERING OF P6M5 RAPID STEEL POWDER

**A. V. Alifanov, I. A. Bogdanovich, J. I. Krivonos,  
V. V. Maleronok, A. M. Miliukova, O. A. Tolkacheva**

### Abstract

Studies have been carried out to study the process of high-voltage electric-discharge sintering of powder of high-speed steel R6M5. The process of high-voltage electric-discharge sintering of powders is accompanied by a complex of electrophysical, thermodynamic and mechanical phenomena that affect the sintering processes of samples and their properties.

It was found that the process of high-voltage electric-discharge sintering of powders of P6M5 steel is accompanied by compaction of the powder as a result of sintering of particles, as well as by the action of compressive stresses on the sample from the powder.

The shape and size of particles, the nature of surface films, the size and shape of the matrix have a great influence on the process of high-voltage electric-discharge sintering.

Factors affecting the strength properties of samples include the particle size distribution of the powder, its initial electrical resistance, and technological processing parameters, such as discharge energy and discharge current density.

**Keywords:** powder, P6M5 steel, high-voltage electric-discharge sintering, sample strength.

### Введение

Анализ литературных данных и патентной информации показывает, что основное количество публикаций по использованию сильного электрического разряда в различных средах и сильного импульсного магнитного поля посвящено вопросам получения высоких импульсных давлений и температур для процессов обработки материалов давлением, сварки, прессования–спекания порошковых материалов, воздействия на структуру и физические свойства с целью упрочнения, повышения износостойкости изделий и т. д.

О возможности спекать порошки, пропуская через них электрический ток, давно известно [1]. Наибольшее распространение получили процессы горячего прессования с пропусканием через порошок постоянного тока промышленной частоты [2]. В Японии появилось новое направление – низковольтное электроразрядное спекание [3], которое получило дальнейшее развитие в США [4] и в СССР [5, 6].

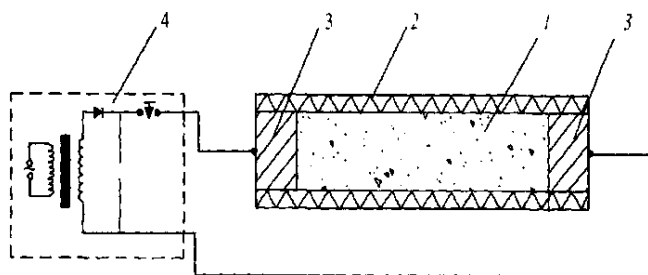
Для низковольтного электроразрядного спекания порошков характерна некоторая критическая величина, выше которой возможно возникновение электрических разрядов во всем объеме прессовки. Нагрев порошка идет как за счет джоулева тепла, так и за счет возникновения электрических искровых разрядов между частицами порошка, благодаря которым происходит интенсивный разогрев металла в приконтактных участках и разрушение окисных пленок с поверхности металлических частиц. Методом низковольтного электроразрядного спекания порошковые материалы спекают в течение нескольких десятков секунд.

В последнее время широко исследуется также метод высоковольтного электроразрядного спекания (ВЭРС) порошков с использованием энергии конденсаторной батареи генератора импульсных токов [7–15].

**Основная часть**

Принципиальная схема устройства для ВЭРС порошков приведена на рисунке 1. Металлический порошок (1) размещается в матрице (2) из изоляционного материала между электродами (3), с помощью которых осуществляется подпрессовка порошка. Электроды подключены к генератору импульсных токов (ГИТ) (4). Электрическая энергия, накопленная в конденсаторной батарее ГИТ, разряжается через порошковый материал 1.

Высоковольтное электроразрядное спекание характеризуется прохождением через порошок импульса электрического тока плотностью свыше  $10^4$  А/см<sup>2</sup> при напряжении 5–20 кВ и более в течение 10–1000 мкс и внешнем удельном давлении до 100 МПа.



1 – порошок; 2 – матрица; 3 – электроды-пуансоны;  
4 – генератор импульсных токов

**Рисунок 1** – Схема устройства для электроразрядного спекания порошков

В зависимости от плотности импульса тока возможны следующие особенности процесса формования:

- при малой плотности тока происходит лидерный пробой, соединение отдельных частиц порошка в результате возникновения жидкой фазы в микроконтактах, образование металлических равномерно рассеянных по объему вкраплений (прессовка плохо сохраняет свою форму после извлечения частиц);
- при средней плотности тока увеличивается плотность металлических вкраплений, формируются металлические нити и волокна, образуется жесткий каркас, несколько уплотняется порошок в поперечном относительно линии тока направлении в результате действия сил, вызванных пинч-эффектом (прессовка сохраняет форму, транспортабельна);
- при плотности тока больше критической величины происходит плавление порошка по отдельным каналам, электрический взрыв и разрушение прессовки.

Процесс ВЭРС металлических порошков при средней плотности тока при переходе от столбика свободно упакованных частиц к заготовке определенной формы и прочности может рассматриваться как трехстадийный. Первая стадия характеризуется электрическим пробоем окисных пленок, при этом происходит образование шеек между металлическими частицами порошка и вследствие этого быстрое начальное падение электросопротивления и образование проводящих нитей. Скорости образования шеек велики для любого диффузионного процесса переноса массы частиц в твердом состоянии. Нагрев всей массы порошкового тела во время роста шеек создает нормальное термическое сопротивление (вторая стадия). Данную стадию отличает также действие электродинамических сил, направленных к центру столбика свободно упакованных частиц и способствующих его уплотнению. Конечная третья стадия характеризуется тем, что уплотненный столбик представляет собой компактное тело с определенной степенью пористости и может служить в качестве проводника электрического тока.

Быстрое начальное падение электросопротивления, обусловленное электрическим пробоем, и рост электросопротивления вследствие нагрева порошкового тела – два основных фактора, влияющих на результирующее электросопротивление в процессе разряда.

Большое влияние на процесс ВЭРС оказывают форма и размер частиц, характер поверхностных пленок, размер и форма матрицы.

О числе вероятных контактов между частицами порошка можно судить с позиции плотности их упаковки и оптимизировать режим процесса спекания.

В данной работе проведено высоковольтное электроразрядное спекание образцов из порошка быстрорежущей стали Р6М5 по принципу, отображенному на рисунке 1. Цилиндрические образцы диаметром 10 и 14 мм высотой 20 и 30 мм соответственно спекали при энергии разряда от 1 до 10 кДж и максимальном напряжении от 2,2 до 5,9 кВ.

Интенсивность разряда и количество выделяемой энергии в значительной степени зависят от электросопротивления изолирующих промежутков, образованных жировыми, окисными и адсорбированными слоями различного состава, покрывающими поверхность частиц, а также воздушными зазорами между ними.

Оценку электрической прочности межчастичной изоляции осуществляли путем измерения электросопротивления порошка, засыпанного в цилиндрический контейнер из диэлектрического материала. Снизу и сверху контейнер закрывали латунными электродами. К электродам подключали ламповый вольтметр ВК-7-9, которым измеряли электросопротивление от 200 Ом и более, или универсальный мост УГИП-60 при измерении сопротивлений менее 10 Ом.

Была исследована зависимость электросопротивления засыпки модельного порошка от усилия сжатия засыпки между электродами для порошков быстрорежущей стали Р6М5 (все порошки в состоянии поставки). Нагружение осуществляли на испытательной машине ZD–10/90.

Зависимость электросопротивления засыпки от усилия сжатия столбика порошка между электродами приведена в табл. 1, из которой видно, что при увеличении усилия прижима от минимального (10 кг) до максимального (100 кг) значения электросопротивление засыпки порошка с размером частиц порядка 200 мкм уменьшается от  $270 \cdot 10^3$  Ом до 0,05 Ом соответственно, а для порошка с размером частиц порядка от 30 до 500 мкм электросопротивление уменьшается от  $1,2 \cdot 10^3$  Ом до 0,02 Ом. В последнем случае электросопротивление уменьшается более эффективно в связи с тем, что мелкозернистые порошки с легкостью заполняют промежутки между крупнозернистыми, увеличивая этим плотность всей засыпки, особенно при нагружении.

**Таблица 1** – Зависимость электросопротивления засыпки порошка Р6М5 от величины нагрузки

Вид порошка	Электросопротивление засыпки, Ом, при усилии прижима, кг								
	10	50	100	150	200	300	500	700	1000
Р6М5 (200 мкм)	$270 \cdot 10^3$	$10^3$	100	14	4	0,9	0,2	0,1	0,05
Р6М5 (30–500 мкм)	$1,20 \cdot 10^3$	20	3,63	0,83	0,45	0,14	0,05	0,04	0,02

В таблице 2 представлены результаты эксперимента по определению влияния электросопротивления засыпки на прочность образцов диаметром 10 мм на сжатие из порошка Р6М5 после электроразрядного спекания с энергией разряда 2 кДж.

**Таблица 2** – Влияние электросопротивления засыпки на прочность спеченного образца на сжатие

Номер образца	Электросопротивление, Ом		Прочность на сжатие, МПа
	до разряда	после разряда	
1	3000	0,0030	5,7
2	271	0,0037	5,0
3	20	–	4,8
4	9,5	0,0040	4,1
5	0,72	0,0030	1,9
6	0,14	0,0024	0
7	0,07	0,0023	0

Из таблицы 2 видно, что исходное электросопротивление порошка оказывает значительное влияние на процесс сварки частиц порошка и, соответственно, на прочность образцов. Максимальную прочность на сжатие (5,7 МПа) имеют образцы, имеющие максимальное электросопротивление до разряда (3000 Ом).

Как показали измерения по осциллограммам тока и напряжения, исходное сопротивление порошка (до разряда) не оказывает влияния на амплитуду и частоту разрядного тока. Это говорит о том, что образование проводящих каналов в массе порошка происходит в предразрядный период путем лидерного пробоя межчастичной изоляции (окисных и жировых пленок и воздушных промежутков). Проходящий затем импульс тока большой плотности осуществляет интенсивный разогрев контактных поверхностей частиц и их сварку.

На рисунке 2 (а, б) представлены фотографии частиц порошка до и после прохождения разрядного тока через образец. На рисунке 2, б видны места сварки частиц.

Процесс высоковольтного электроразрядного спекания сопровождается некоторым уплотнением порошка в результате слияния частиц, а также действия на образец сжимающих напряжений, вызываемых пинч-эффектом в поперечном относительно линии тока направлении. Пористость образцов диаметром 10 мм при увеличении плотности тока от 100 до 330 кА/см<sup>2</sup> уменьшилась на 14 %, а образцов диаметром 14 мм – на 5 %, что можно объяснить тем, что удельное давление на образец диаметром 10 мм превышает удельное давление на образец диаметром 14 мм, так как усилия сжатия образцов в обоих случаях были одинаковыми.

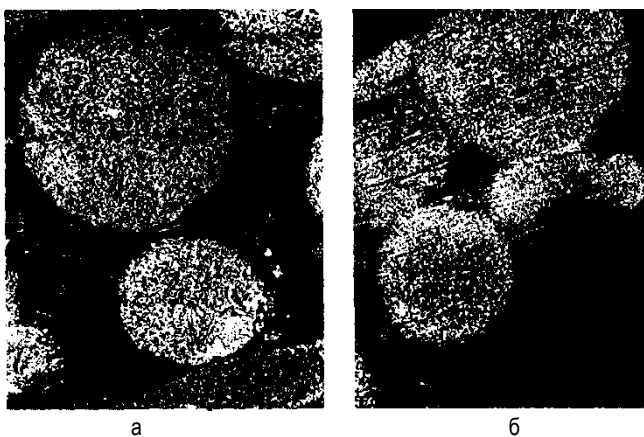


Рисунок 2 – Макроструктура образцов из порошка Р6М5 до (а) и после (б) высоковольтного электроразрядного спекания х 200

Зависимости прочности на сжатие от энергии разряда представлены на рисунке 3. Из приведенных зависимостей следует, что в исследованном диапазоне энергии разряда прочность образцов из материала Р6М5 линейно зависит от подводимой энергии. Прочность образцов диаметром 10 мм увеличивается более интенсивно, чем образцов диаметром 14 мм, так как удельная энергия, воздействующая на образец диаметром 10 мм, превышает удельную энергию, действующую на образец диаметром 14 мм, что приводит к более значительному уплотнению порошка.

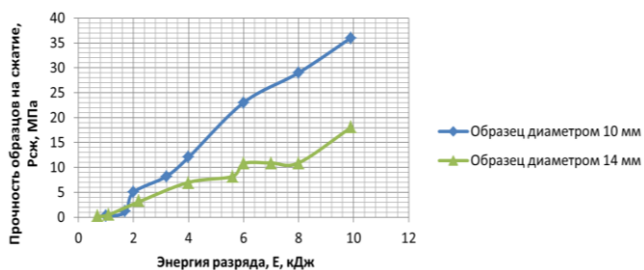


Рисунок 3 – Зависимость прочности образцов на сжатие от энергии разряда

На рисунке 4 показана зависимость прочности образцов, изготовленных из порошка Р6М5, от плотности тока. Под плотностью тока ( $j$ , кА/см<sup>2</sup>) подразумевается отношение силы тока к площади поперечного сечения проводника, в данном случае – образца из порошка стали Р6М5.

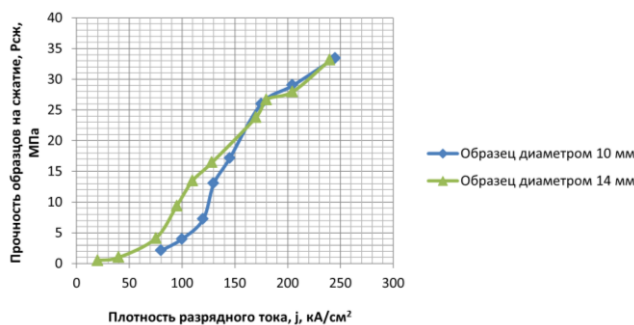


Рисунок 4 – Зависимость прочности образцов на сжатие от плотности разрядного тока

Как показали исследования, в данном случае диаметр образца существенно не влияет на его прочность при сжатии, так как разрядный ток равномерно распределяется по всей поверхности образца. Поэтому зависимости прочности образцов диаметром 10 и 14 мм от плотности разрядного тока мало отличаются друг от друга и характер данных зависимостей стремится к линейному.

#### Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- 1) процесс высоковольтного электроразрядного спекания порошков сопровождается комплексом электрофизических, термодинамических и механических явлений, оказывающих влияние на процессы спекания образцов и их свойства;
- 2) среди факторов, влияющих на количество спаек между частицами порошка и, соответственно, на прочностные свойства спеканных данным способом образцов, следует отметить гранулометрический состав порошка, его исходное электросопротивление, а также технологические параметры обработки, такие как энергия разряда и плотность разрядного тока.

#### Список цитированных источников

1. Патент США № 2355954. Способ спекания порошков / Г. Кремер. – Оubl. 15.08.1944.
2. Самсонов, Г. В. Горячее прессование / Г. В. Самсонов, М. С. Ковальченко. – Киев : Наукова думка, 1962. – 126 с.
3. Патент Японии № 3241956. Электроразрядное спекание / Иноуэ Киёси. – Оubl. 29.10.1963.
4. Goetzel, E. G. Electric discharge sintering of powders / E. G. Goetzel, V. S.de Macchi. // Power Metall Intern. – 1971. – Vol. 3, № 2. – 30 p.
5. Райченко, А. И. Стойкость материалов электродов-пунсонов и матриц в процессе электроразрядной обработки металлических порошков / А. И. Райченко, О. Н. Рябина // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 3. – С. 38–41.
6. Райченко, А. И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока / А. И. Райченко. – М. : Металлургия, 1987. – 128 с.
7. Clyens, S. // Int. J. of Mechanical Sciences / S. Clyens., S. Al-Hassani, W. Johnson. – 1976. – № 18. – P. 37.
8. Аль-Хассани, С. Т. Электроразрядное уплотнение порошков / С. Т. Аль-Хассани // Прогрессивные технологические процессы в порошковой металлургии. – Минск : Вышэйш. шк., 1982. – С. 81–89.
9. Мальцев, И. М. Электрокомпактирование металлических материалов / И. М. Мальцев // Современные технологии и материаловедение : сборник научных трудов. – Магнитогорск : МГТУ, 2003. – С. 165–168.

10. Мальцев, И. М. Исследование процесса электроимпульсного спекания порошка при прокатке / И. М. Мальцев, В. Г. Петриков // Управление строением отливок и слитков: Межвузовский сборник научных трудов. – Нижний Новгород : РГГТУ, 1998. – С. 136–138.
11. Высоковольтное ударное электроимпульсное спекание / С. В. Лемешев [и др.] // Волновые, виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях : сборник трудов международного научного симпозиума технологов-машиностроителей и механиков. – Ростов-на-Дону, 2014. – С. 130–136.
12. Спекание металлических порошков серий сильноточных импульсов / Н. Н. Заводов [и др.] // ТВТ. – 1999. – Т. 37, Вып. 1. – С. 135–141.
13. Белявин, К. Е. Получение пористых материалов из тугоплавких металлов методом электроимпульсного спекания / К. Е. Белявин, В. К. Шелег // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 2. – С. 68–77.
14. Рябинина, О. М. Физико-механические свойства композитов, полученных электроразрядным спеканием / О. М. Рябинина // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2005. – Том 2, № 10. – С. 102–106.
15. Разрядно-импульсное прессование композиционных материалов / С. В. Нескоромный [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – № 4 (83). – С. 76–81.
6. Rajchenko, A. I. Osnovy processa spekaniya poroshkov propuskaniem elektricheskogo toka / A. I. Rajchenko. – M. : Metallurgiya, 1987. – 128 s.
7. Clyens, S. // Int. J. of Mechanical Sciences / S. Clyens., S. Al-Hassani, W. Johnson. – 1976. – № 18. – R. 37.
8. Al'-Hassani, S. T. Elektrorazryadnoe uplotnenie poroshkov / S. T. Al'-Hassani // Progressivnye tekhnologicheskie processy v poroshkovoj metallurgii. – Minsk : Vyshejsh. shk., 1982. – S. 81–89.
9. Mal'cev, I. M. Elektrokompaktirovanie metallicheskih materialov / I. M. Mal'cev // Sovremennye tekhnologii i materialovedenie : sbornik nauchnyh trudov. – Magnitogorsk : MG TU, 2003. – S. 165–168.
10. Mal'cev, I. M. Issledovanie processa elektroimpul'snogo spekaniya poroshka pri prokatke / I. M. Mal'cev, V. G. Petrikov // Upravlenie stroeniem otlivok i slitkov: Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov. – Nizhnij Novgorod : RGGTU, 1998. – S. 136–138.
11. Vysokovolt'noe udarnoe elektroimpul'snoe spekanie / S. V. Lemeshev [i dr.] // Volnovye, vibrovolnovye tekhnologii v mashinostroenii, metalloobrabotke i drugih otraslyah : sbornik trudov mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma tekhnologov-mashinostrotelej i mekhanikov. – Rostov-na-Donu, 2014. – S. 130–136.
12. Spekanie metallicheskih poroshkov seriej sil'notochnyh impul'sov / N. N. Zavodov [i dr.] // TVT. – 1999. – Т. 37, Вып. 1. – С. 135–141.
13. Belyavin, K. E. Poluchenie poristykh materialov iz tugoplavkikh metallov metodom elektroimpul'snogo spekaniya / K. E. Belyavin, V. K. Sheleg // Teoriya i praktika mashinostroeniya. – 2004. – № 2. – S. 68–77.
14. Ryabinina, O. M. Fiziko-mekhanicheskie svojstva kompozitov, poluchennykh elektrorazryadnym spekaniem / O. M. Ryabinina // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2005. – Том 2, № 10. – С. 102–106.
15. Razryadno-impul'snoe pressovanie kompozitsionnykh materialov / S. V. Neskoromnyj [i dr.] // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2015. – № 4 (83). – S. 76–81.

#### References

Материал поступил в редакцию 06.12.2021