

2. Патент № 89732 Україна МПК С04 В 35/00. Надтвердий матеріал / О. О. Шульженко, О. М. Соколов, В. Г. Гаргін та інш. – Опубл. 25.02.10, Бюл. № 4.
3. Патент № 2413699 Россия МПК С04 В 35/528, С04 В 35/5835. Сверхтвердый материал / Е. Е. Ашкинази, В. Г. Ральченко, В. И. Конов и др. – Опубл. 10.03.11, Бюл. № 7.
4. Свідоцтво України на знак для товарів і послуг № 158183. – Гібридайт. – Опубл. 10.07.12, Бюл. № 13.
5. Новый гибридный ультратвердый материал / А. А. Шульженко, Е. Е. Ашкинази, А. Н. Соколов и др. // Сверхтвердые материалы. – 2010. – № 5. – С. 3–14.
6. Podgursky, V., Hantschel, T., Bogatov, A., Kimmari, E., Antonov, M., Viljus, M., Mikli, V., Tsigkourakos, M., Vandevorst, W., Buijnsters, J. G., Raadik, A. T., Kulu, P. Rippling on wear scar surfaces of nanocrystalline diamond films after reciprocating sliding against ceramic balls. Tribology Letters. – 2014. – 55. – N 3. – P. 493–503/

Поступила 20.07.15

УДК 621.762.3:537.528

**О. Н. Сизоненко**, д-р техн. наук<sup>1</sup>, **Е. В. Липян**, **Н. С. Присташ**, **А. А. Коваленко**<sup>1</sup>, **Н. А. Олейник**,  
канд. техн. наук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

<sup>2</sup>Институт сверхтвердых материалов им.В.Н.Бакуля НАН Украины, г. Киев

### **ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАРБИДОСТАЛЕЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ АЛМАЗНЫМ МИКРОПОРОШКОМ**

*Рассмотрены возможности применения импульсной электроразрядной обработки алмазных микропорошков для модификации карбидосталей. Показана эффективность метода для целенаправленного управления свойствами как непосредственно микропорошков, так и консолидированных материалов.*

**Ключевые слова:** порошок, алмаз, карбидосталь, высоковольтный электрический разряд, твердость, износостойкость

#### **Введение**

Влияние на структуру материалов – актуальная научно-техническая проблема современного материаловедения, открывающая пути управления свойствами гетерогенных систем – смеси дисперсных тел различной физической и химической природы и выдвигающая необходимость поиска методов управления их свойствами с учетом кинетических закономерностей физико-химических явлений и процессов [1].

Основные достижения и перспективы использования высокодисперсных порошков связаны с возможностью направленного синтеза свойств, которые определяются технологией их получения. Способ изготовления порошков алмаза, в котором применяют импульсное воздействие высоковольтными электрическими разрядами (ВЭР обработка) в жидкости описан в работах [2–5]. Как известно, высокая концентрация энергии в канале разряда приводит к возникновению электромагнитных полей, близких к ударным волнам давления, которые трансформируются в акустические с широким спектром частот, мощные гидротоки и кавитацию. Эти явления позволяют влиять как на геометрические размеры объекта, так и на структуру материалов в целях придания им определенных механических и физических свойств. В частности, установлено, что после ВЭР обработки существенно улучшаются адсорбционно-структурные характеристики порошков, повышается дисперсность. Следовательно, такая обработка эффективна для изготовления алмазных шлиф- и микропорошков со сниженным содержанием примесей, дополнительными

режущих кромками и повышенной абразивной способностью [4].

Повышение эффективности и долговечности шлифовального и бурового инструмента связано с созданием композиционных материалов при использовании сверхтвердых материалов, влияющих на их структурные и физико-химические свойства [6–8].

Доказано, что карбидосталь, консолидированная из шихты, после предварительной импульсной ВЭР обработки порошков, приобретает повышенные физико-механические свойства по сравнению со стандартными быстрорежущими сталями [5, 9–10].

С учетом изложенного, вызывает интерес исследование возможности производства консолидированных инструментальных материалов, например карбидосталей, из шихты с предварительной ВЭР обработкой и модификацией состава.

**Цель** настоящей работы – установить влияние модифицирования шихты карбидосталей путем ВЭР обработки исходных металлических порошков и введения микропорошка алмаза на функциональные свойства материалов, получаемых искроплазменным спеканием.

#### **Методика исследования**

Образцы для исследования подготавливали с помощью экспериментального стенда, схема и описание которого приведены в [2]. Смеси металлических порошков (75 % Fe + 25 % Ti) подвергали ВЭР обработке в керосине в соответствии с методикой, изложенной в [10]. Алмазный микропорошок марки АСМ 40/28 обрабатывали в дистиллированной воде. Напряжение заряда накопителя составляло 50 кВ, удельная энергия воздействия на порошок – 5,8 МДж/кг. Для того, чтобы воздействовать исключительно на форму частиц порошка с минимальным влиянием на их размеры микропорошок обрабатывали при пониженной удельной энергией воздействия (5,8 МДж/кг) в отличие от ранее проводимых исследований [3–5].

Исследовали топографию обработанной поверхности и физико-механические характеристики исходных порошков и образцов, консолидированных искроплазменным спеканием.

Размеры и форму частиц исследовали посредством компьютерного анализа фотографий, полученных с помощью оптического микроскопа "Биолам-И". Шероховатость определяли как отношение периметра выпуклого контура к действительному периметру частицы, фактор формы – как отношение максимального линейного размера проекции частицы к ее минимальному размеру.

Алмазные микропорошки добавляли в порошковую композицию состава 75 % Fe + 25 % Ti и шихту для изготовления карбидостали на ее основе, полученную импульсной электроразрядной обработкой в углеводородной жидкости, после чего их консолидировали. Масса порошка алмаза АСМ 40/28 составляла 1 % от массы порошковой шихты. Консолидировали образцы искроплазменным спеканием с помощью экспериментального комплекса «Гефест-10» при давлении 60 МПа и скорости повышения температуры  $10^0$ С/с до 1100 °С [5]. Продолжительность выдержки при средней силе тока 1300 А составляла 3 мин. Далее определяли твердость по Роквеллу и износостойкость спеченных образцов. Износостойкость определяли с помощью машины для трения СМЦ-2 по схеме ролик – колодка. В качестве контртела использовали алмазный круг 1А1 зернистостью АС4 80/63 при давлении 0,75 МПа. Для сравнения полученных результатов использовали образец стали Р6М5 после закалки и отпуска.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Результаты исследования топографии поверхности свидетельствуют, что вследствие импульсной ВЭР обработки алмазного микропорошка АСМ 40/28 изменяется геометрия поверхности частиц (рис. 1). Шероховатость частиц исходного порошка составляет 0,96–1,00, причем шероховатость преобладающего количества частиц (более 75 %) – 0,995 (кривая 1, рис. 2). После ВЭР обработки микропорошка в воде доля частиц с шероховатостью порядка 0,995 (менее 65 %) – уменьшается, при этом шероховатость составляет 0,90–1,00 (кривая 2, рис. 2).

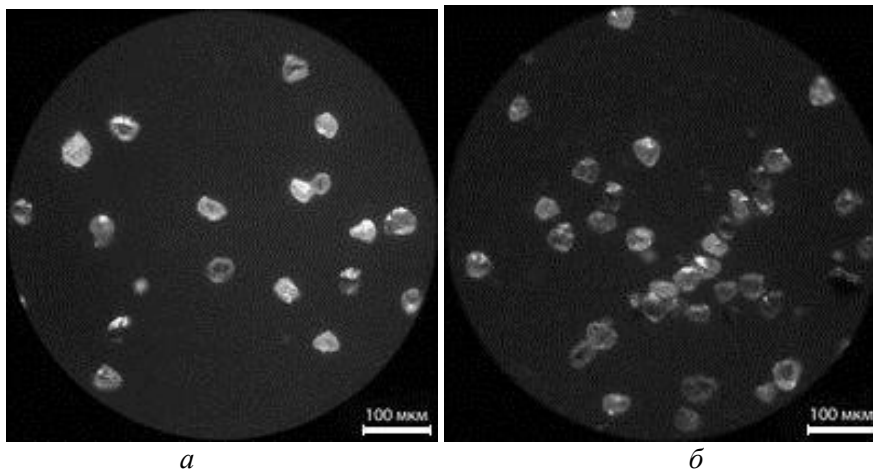


Рис. 1. Фотографии порошка АСМ 40/28: а – исходного; б – после ВЭР обработки

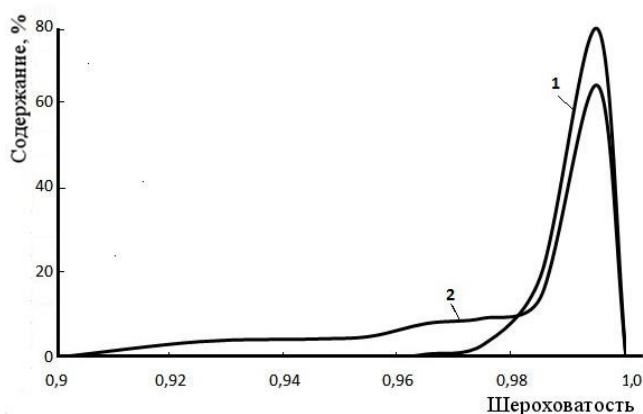


Рис. 2. Распределение частиц порошка АСМ 40/28 по шероховатости: 1 – исходного; 2 – после ВЭР обработки

Импульсная ВЭР обработка приводит к изменению фактора формы порошка. Исходный порошок имел форму в близкую к округлой. Частицы с фактором формы от 0,6 до 1 составляют более 90 % (рис. 3, столбики 1). После обработки содержание частиц с таким фактором формы снизилось до 70 % (столбики 2, рис. 3). Появились осколки от разрушения кристаллов.

В результате анализа распределения частиц по размерам выявили, что импульсная ВЭР обработка при указанных параметрах несущественно изменяет дисперсность порошка (рис. 4). Распределение по размерам частиц исходного порошка и

после воздействия одинаково. В результате ВЭР обработки появляется лишь небольшое количество частиц (до 5 масс. %) фракции размером 20–25 мкм.

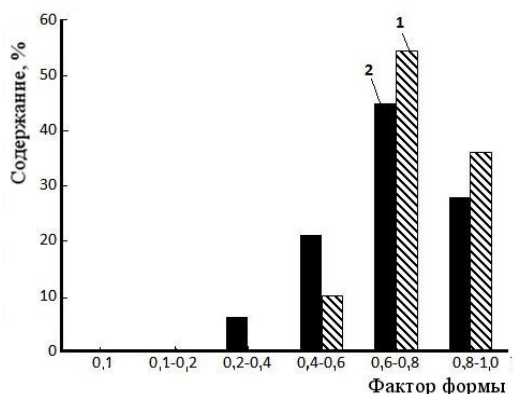


Рис. 3. Распределение частиц порошка АСМ 40/28 по фактору формы: 1 – исходного; 2 – после ВЭР обработки

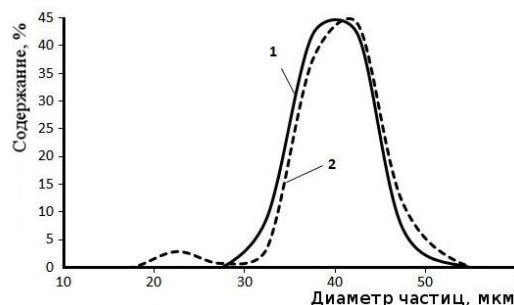


Рис. 4. Распределение частиц порошка АСМ 40/28 по размерам: 1 – исходного; 2 – после ВЭР обработки

Как известно, в процессе ВЭР обработки частицы порошка исходного состава 75 % Fe + 25 % Ti интенсивно измельчаются и активируются; происходит изменение фазового состава смеси; синтез карбидов размером 100–600 нм [5; 9; 10]. Для оценки влияния введенных в состав шихты карбидосталей алмазных микропорошков после их ВЭР обработки на функциональные свойства получаемых материалов исследовали компакты, полученные искроплазменным спеканием (см. таблицу 1).

#### Состав порошковой шихты и свойства консолидированных материалов

Номер образца	Материал системы	Твердость HRC	Потеря массы на 1 км, мг
1	Fe–Ti–C	40	38
2	Fe–Ti–C + 1% АСМ 40/28 (исх.)	47	19,0
3	Fe–Ti–C + 1% АСМ 40/28 (после ВЭР обработки)	54	18,5
4	Сталь Р6М5	62	40

Твердость полученных в результате консолидации образцов составила 40 HRC, потеря массы – 38 мг (образец 1 в таблице 1). Такой результат обусловлен тем, что после ВЭР обработки порошковой смеси в её составе образовались карбиды металлов, резко увеличилось содержание упрочняющей фазы в материале, повысились его твердость и износ вследствие выкрашивания твердых частиц. На рис. 5, *а* хорошо видны образовавшиеся глубокие линии трения, свидетельствующие о неоднородном характере износа.

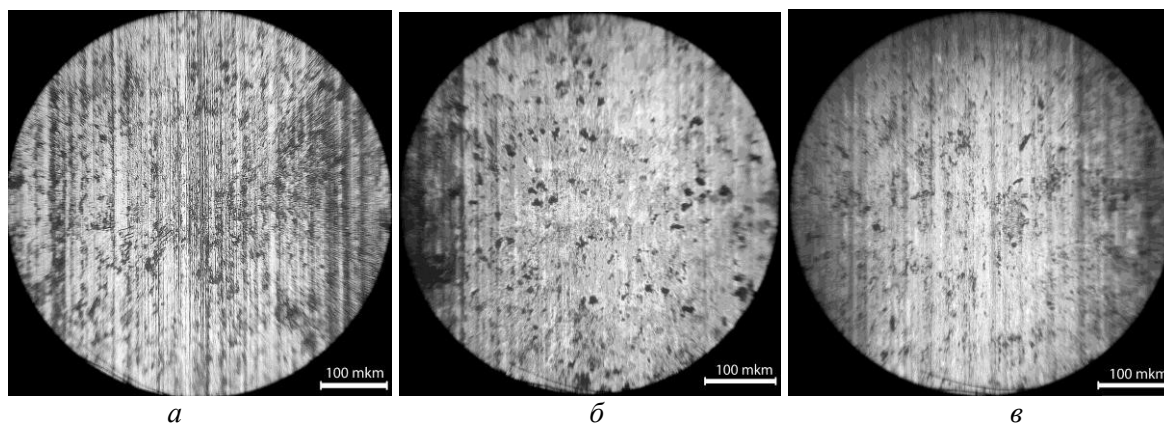


Рис. 5. Фотографии поверхности с характерными линиями трения образцов: *а* – 1; *б* – 2; *в* – 3

Введение в состав шихты 1 масс. % исходного порошка АСМ 40/28 (серия № 2, табл. 1) позволило увеличить твердость консолидированных образцов до 47 HRC, повысив износостойкость. На рис. 5, *б* видно улучшение состояния поверхности образца и уменьшение глубины полос трения по сравнению с образцами, полученными из шихты исходного состава 75 % Fe + 25 % Ti (за счет наличия дисперсных включений) без добавления алмазного микропорошка. Потеря массы составила 19,0 мг на 1 км, что в ~ 2 раза меньше, чем для образца из стали Р6М5. Следовательно, для получения твердых и износостойких материалов, консолидируемых искроплазменным спеканием перспективно порошковую шихту после ВЭР обработки металлических порошков модифицировать, добавляя микропорошок алмаза.

Вследствие ВЭР обработки металлических порошков смеси исходного состава 75 % Fe + 25 % Ti и микропорошка алмаза АСМ 40/28 твердость консолидированных образцов повысилась на 35 % – от 40 до 54 HRC (образец 3 в таблице 1). После ВЭР обработки микропорошка алмаза со сниженной удельной энергией воздействия незначительно (на 6 %) повысилась износостойкость консолидированных образцов по сравнению с образцом, для которого использовали порошок алмаза без ВЭР обработки. Фотографии микроструктуры образцов после испытания на машине трения свидетельствуют о более равномерном распределении включений (рис. 5, *в*). Следует отметить, что в

обоих случаях при введении в шихту алмазного микропорошка износостойкость консолидированных образцов значительно превышает износостойкость образца закаленной быстрорежущей стали Р6М5. Сочетание функциональных свойств полученных материалов наилучшее среди рассматриваемых.

Таким образом, перспективно исследовать влияние параметров ВЭР обработки исходных порошков на характеристики карбидосталей, полученных искроплазменным спеканием, а также определить оптимальные параметры и рецептурный состав. С учетом того, что свойства образца Р6М5 были рассмотрены после термообработки, в дальнейшем необходимо исследовать влияние параметров термообработки карбидостали, полученной искроплазменным спеканием, на ее функциональные характеристики.

#### **Выводы**

Установлено, что с применением импульсной ВЭР обработки исходных порошков металла и микропорошков алмаза при подготовке шихты для консолидации искроплазменным спеканием карбидосталей функциональные характеристики получаемых материалов изменяются.

Импульсная ВЭР обработка алмазного микропорошка АСМ 40/28 с удельной энергией 5,8 МДж/кг позволяет целенаправленно изменять геометрию поверхности частиц, не воздействуя на их дисперсность.

С добавлением в шихту микропорошка алмаза марки АСМ 40/28 с поверхностью, модифицированной импульсной ВЭР обработкой, значительно возрастает твердость (до 54 HRC) при высокой износостойкости. Потеря массы обрабатываемого образца составляет 18,5–19,0 мг/к. Получаемый материал по твердости приближается к термообработанной инструментальной стали Р6М5, а по износостойкости значительно превосходит ее, обладая оптимальным сочетанием функциональных свойств для класса карбидосталей.

*Rozgljnuto mozhливості застосування імпульсного електророзрядного оброблення алмазних мікропорошків для модифікації карбідосталей. Показано ефективність методу для цілеспрямованого управління властивостями як безпосередньо мікропорошків, так і консолидованих матеріалів.*

**Ключові слова:** порошок, алмаз, карбідосталь, високовольтний електричний розряд, твердість, зносостійкість

*Possibilities of pulsed electric discharge treatment of diamond micropowders application for carbide-steels modification are considered. Method efficiency for aimed management of properties of micropowders as well as of obtained composite materials is shown.*

**Key words:** powder, diamond, carbide-steel, high voltage electric discharge, hardness, wear resistance

#### **Литература**

1. Неорганическое материаловедение: в 2-х т. / под ред. Г.Г. Гнесина, В.В. Скорохода. – К. : Наук. думка, 2008. – Т. 1: Основы науки о материалах. – 1151 с.
2. Влияние высоковольтных импульсных разрядов на морфометрические характеристики алмазных микропорошков / О. Н. Сизоненко, Г. П. Богатырева, А. Л. Майстренко и др. // Вісн. укр. матеріалознавчого то-ва. – 2010. – Вип. 3. – С. 23–32.
3. Пат. 49909 Україна, МПК В 24 D 3/06, С 01 В 31/06. Спосіб виготовлення мікропорошків надтвердого матеріалу / Г.П. Богатирьова, А.Л. Майстренко, О.М. Сизоненко, Н.О. Олійник, Г.Д. Ільницька, Г.А. Петасюк, Ю.В. Нестеренко, Е.І. Тафтай, А.С. Торпаков, Е.В. Липян. – Заявл. 30.12.2009; Опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9.
4. Влияние электроразрядной обработки алмазных порошков на изменение их физико-механических характеристик / О.Н. Сизоненко, Н.А. Олейник, Г.А. Петасюк и др. // Порошковая металлургия. – 2013. – № 7/8. – С. 3–8.
5. Разрядно-импульсная технология обработки порошков / А.Д. Зайченко, О.Н. Сизоненко, Е.М. Шерегий и др. // Вісн. Нац. технічн. ун-ту «ХПІ»: Зб. наук. пр. Сер. Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», – 2014. – № 50 (1092). – С. 151–160.

6. Синтетические сверхтвердые материалы : В 3 т. / Редкол. Н.В. Новиков (отв. ред.) и др. – К.: Наук. думка, 1986. – Т. 2: Композиционные инструментальные сверхтвердые материалы. – 264 с.
7. Вовчановский И.Ф. Породоразрушающий инструмент на основе славутича для бурения глубоких скважин / И.Ф. Вовчановский // К.: Наук. думка, 1979. – 210 с.
8. Дослідження й відпрацювання методів змішування порошкових матеріалів металеві матриці бурового інструменту / Г.П. Богатирьова, Г.Д. Ільницька, О.М. Ісонкін, Н.О. Олійник // Наукові нотатки. – 2011. – Вип. 35. – С. 19–22.
9. High voltage electric discharge in liquid as a method of preparation of blend for carbide steels / O.N. Sizonenko, E.G. Grigoriev, A.D. Zaichenko et al. // International virtual journal for science, technics and innovations for the industry. – 2013. – Y. VII, Is. 10. – P. 19–22.
10. Пат. 97319 Україна МПК С 22С 1/04, С 22С 21/00. Спосіб одержання металоматричних композиційних матеріалів / О.М. Сизоненко, Є.В. Липян, А.Д. Зайченко, А.С. Торпаків, М.С. Присташ, В.О. Трегуб. – Заявл. 11.09.2014; Опубл. 10.03.2015, Бюл. № 5.

Поступила 28.05.15

УДК 539.89

С. А. Виноградов, канд. техн. наук

Институт сверхтвердых материалов НАН Украины им. В.Н. Бакуля, г. Киев

## ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДИСКА, СЖИМАЕМОГО МЕЖДУ ПЛОСКИМИ НАКОВАЛЬНЯМИ БРИДЖМЕНА

*Кратко проанализированы методы расчета напряженного состояния диска, сжимаемого между плоскими наковальнями Бриджмена. Показано, что для случая сжатия плоского диска задача сводится к решению одного уравнения с тремя неизвестными, для однозначного решения которого следует ввести дополнительные гипотезы, что снижает достоверность получаемых результатов. Предложенные методы расчета используют для решения узкого класса задач. Для повышения общности получаемых результатов предложено использовать метод, в основу которого положено минимальное количество гипотез и надежные экспериментально установленные факты.*

**Ключевые слова:** наковальня Бриджмена, напряженное состояние диска.

Задача расчетного определения напряженного состояния диска, сжимаемого между плоскими наковальнями Бриджмена, решалась во многих работах, например [1–8]. В этих работах используют известное решение в механике деформированного твердого тела применительно к обработке металлов давлением, а именно решение задачи о напряженном состоянии круглого металлического диска, подвергаемого осадке между плоскими плитами [9]. Система уравнений равновесия осесимметричного тела имеет вид [9]

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$$
$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0$$
(1)

где компоненты напряжения  $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta, \tau_{rz}$  являются функциями координат  $r$  и  $z$ .

Покажем, что для случая сжатия плоского диска, боковая поверхность которого свободна от касательных напряжений, второе уравнение системы (1) удовлетворяется тождественно, и система уравнений равновесия сводится к первому уравнению.