

А. Д. ЗАЙЧЕНКО, мл. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

О. Н. СИЗОНЕНКО, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

Е. М. ШЕРЕГИЙ, PhD., Dsc., Prof., Центр микроэлектроники и нанотехнологий Жешувского университета, Жешув, Польша;

Е. В. ЛИПЯН, мл. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

А. С. ТОРПАКОВ, мл. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

Н. С. ПРИСТАШ, мл. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

В. А. ТРЕГУБ, инженер, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ПОРОШКОВ

Рассмотрены возможности разрядно-импульсной технологии обработки порошков разного состава с целью их диспергирования, активации, инициации структурно-фазовых превращений, синтеза порошковой шихты для создания материалов с повышенными физико-механическими и функциональными свойствами. Для исследуемых порошков металлов, твердых и сверхтвердых материалов установлены режимы обработки, обеспечивающие требуемый уровень дисперсности и необходимый фазовый состав.

Ключевые слова: высоковольтный электрический разряд, дисперсная система, диспергирование, активация, синтез, модификация поверхности, порошки, карбиды металлов, алмазы, твердые сплавы, карбид кремния, карбид бора, карбидостали.

Введение. Развитие основных отраслей современного машиностроения предъявляет к конструкционным и инструментальным материалам неуклонно возрастающие требования к статической и динамической прочности, сопротивлению хрупкому разрушению, износостойкости в различных условиях эксплуатации. Уровень перечисленных свойств определяет в значительной степени надежность деталей, узлов, рабочих органов машин, механизмов, технологической оснастки и оборудования [1].

Одним из эффективных путей существенного повышения основных физико-механических и эксплуатационных свойств конструкционных материалов является подход, предусматривающий диспергирование структуры таких материалов до субмикронного или наноразмерного уровня, согласно соотношения Холла-Петча [2–6]. В порошковой металлургии такой подход может

© А. Д. Зайченко, О. Н. Сизоненко, Е. М. Шерегий, Е. В. Липян,
А. С. Торпаков, Н. С. Присташ, В. А. Трегуб, 2014

реализовываться как на стадии подготовки порошков, так и в процессе изготовления изделий и заготовок. Поэтому вызывают интерес технологии, которые позволяют активировать и диспергировать частицы порошков до ультрадисперсных размеров.

Известно, что наиболее эффективными и экологически безопасными методами воздействия на различные дисперсные системы являются физические методы, которые способствуют изменению их свойств. Одним из таких методов является использование высоковольтного электрического разряда (ВЭР), который характеризуется сочетанием воздействия электромагнитных полей и высокой скорости ввода энергии в плазменный канал разряда, что приводит к возникновению термических полей непосредственно в канале разряда и его ближней зоне, а также формированию волн давления в жидкости, близких к ударным, которые трансформируются в акустические с широким спектром частот, а также мощные гидропотоки и кавитацию.

Эти явления способствуют применению разрядно-импульсных технологий (РИТ), которые базируются на использовании ВЭР, во многих отраслях промышленности, поскольку позволяют влиять как на изменение геометрических размеров объекта, так и на структуру материалов с целью придания им определенных механических и физических свойств.

Целью данной работы является рассмотрение возможностей РИТ обработки порошков разного состава с целью их диспергирования, активации, инициации структурно-фазовых превращений, синтеза порошковой шихты для создания в итоге материалов с повышенными физико-механическими свойствами.

Материалы и методы. Для исследований были использованы дисперсные системы типа «порошок – жидкость». Исследовались порошки алмаза, кубического нитрида бора, карбида кремния, а также железа, титана, кобальта, карбида вольфрама, карбида бора и их смеси (составов ВК6+1 % АСУД75, 75 % Fe + 20 % Ti + 5 % В₄С, 75 % Fe + 25 % Ti и 20 % Fe + 80 % Ti). В качестве жидкой фазы использовалась дистиллированная вода и углеводородная жидкость – керосин. Для интенсификации процессов диспергирования в жидкость добавлялись растворы поверхностно-активных веществ (ПАВ): катионоактивный ПАВ Катапин-бактерицид концентрацией 6 г/дм³ и многокомпонентная смесь анионных и неионогенных ПАВ НМК-РХ концентрацией 3 г/дм³ [7].

Исследования проводились на экспериментальном стенде, схема и описание которого приведены в работах [8, 9]. Разрядная камера снабжена электродной системой типа «острие – плоскость» с регулируемым межэлектродным промежутком. Параметры обработки варьировались в пределах: напряжение заряда накопителя – от 25 до 50 кВ; индуктивность разрядного контура – от 0,6 до 3 мкГн; скорость нарастания тока – от 11 до 30 ГА/с; удельная энергия от 10 до 40 МДж/кг.

Анализ размеров и формы частиц выполнялся на микроскопах – оптиче-

ском Биолам-И, электронном – РЭММА-105 по микрофотографиям в среде Image Pro Plus; диагностика морфометрических характеристик алмазов – на приборе «DiaInspect.OSM», рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ – на дифрактометре ДРОН-3 (излучение $\text{Cu}_{K\alpha}$, база JCPDS PDF-2), количество образовавшейся фазы карбида титана определялось методом «подмешивания» [10].

Консолидация порошков проводилась методом искро-плазменного спекания (ИПС) на экспериментальном оборудовании «Гефест-10» [11]. Консолидированные образцы исследовались методами рентгеноструктурного и микроскопического анализа, измерялись их износостойкость, твердость и прочность на изгиб.

Результаты и обсуждение. Экспериментальные исследования показали, что ВЭР обработка микропорошков алмаза АСМ 20/14 в воде и водных растворах Катапина приводит к уменьшению средних значений параметров, характеризующих размер частиц микропорошка, увеличению удельной поверхности и существенному изменению как качественной, так и количественной картины распределения частиц микропорошка по размерам [12]. Установлено, что при увеличении скорости нарастания тока di/dt от 11 до 30 ГА/с, при одинаковой удельной энергии обработки $W_{уд} = 40$ МДж/кг, интенсифицируются процессы изменения всех морфометрических характеристик алмазных микропорошков АСМ 20/14, а минимальный размер частиц уходит в область < 1 мкм. Использование в качестве рабочей среды водного раствора Катапина позволяет добиться увеличения доли мелкодисперсных частиц, а также изменения формы частиц микропорошка АСМ 20/14 [13].

Правомерность выявленных тенденций связи зависимости морфометрических характеристик микропорошков АСМ 20/14 с параметрами ВЭР воздействия подтвердилась при обработке микропорошков кубического нитрида бора ВМ 2/1. Увеличение удельной энергии обработки с 10 до 20 МДж/кг и скорости нарастания тока с 16 до 25 ГА/с позволило интенсифицировать процесс измельчения частиц микропорошков кубического нитрида бора ВМ 2/1. Установлено, что ВЭР обработка при $W_{уд} = 20$ МДж/кг и $di/dt = 25$ ГА/с обеспечивает увеличение содержания частиц размером $< 0,5$ мкм от 1 до 78 % (см. рис. 1) [14].

Аналогичный результат наблюдается и при ВЭР воздействии в воде на порошки твердого сплава ВК6 (карбид вольфрама + 6 % Со) с добавкой 1 % ультрадисперсного синтетического алмаза АСУД75. Увеличение удельной энергии воздействия с 10 до 20 МДж/кг на водную суспензию смеси порошков ВК6 + АСУД75 существенно смещает распределение частиц по размерам в область мелких фракций. Одномодальное распределение по размерам исходного порошка от 0,5 до 6 мкм с пиком ~ 2 мкм после ВЭР обработки принимает бимодальный вид с диапазонами размеров от 0,1 до 0,8 мкм и от 1 до 5 мкм с пиками $\sim 0,3$ и ~ 2 мкм соответственно (см. рис. 2), а удельная поверхность увеличивается от $3,8 \text{ м}^2/\text{см}^3$ до $14,8 \text{ м}^2/\text{см}^3$ [15].

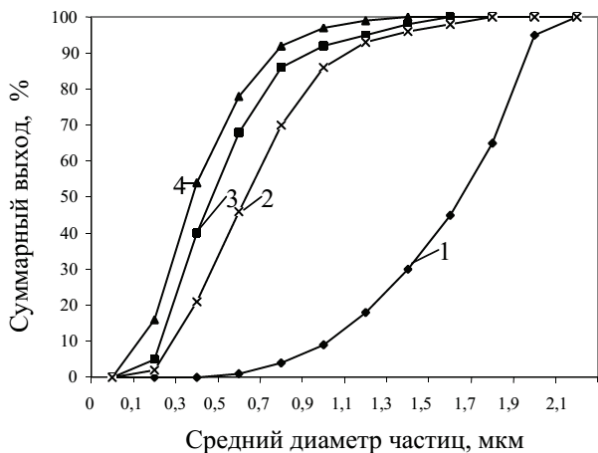


Рисунок 1 – Распределение по размерам частиц микропорошка кубонита VM 2/1: 1 – исходный порошок; 2 – обработанный при $W_{уд} = 10$ МДж/кг и $di/dt = 16$ ГА/с; 3 – обработанный при $W_{уд} = 20$ МДж/кг и $di/dt = 16$ ГА/с; 4 – обработанный при $W_{уд} = 20$ МДж/кг и $di/dt = 25$ ГА/с

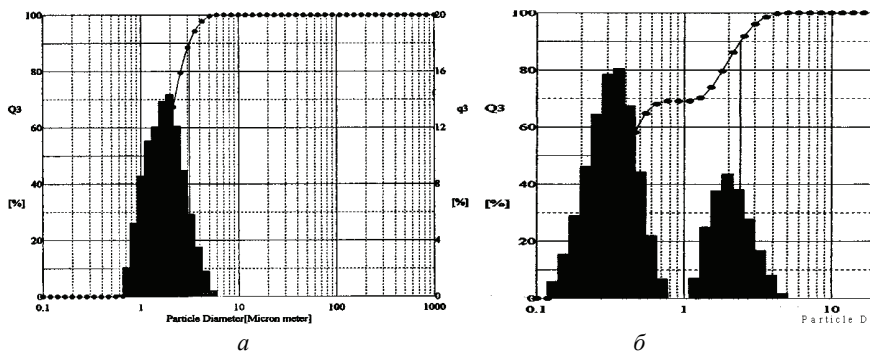


Рисунок 2 – Распределение по размерам частиц порошка VK6 и ACSUD75: а – исходный порошок; б – порошок, обработанный при $W_{уд} = 20$ МДж/кг

ВЭР обработка порошка карбида кремния в воде при скорости нарастания тока 25 ГА/с и удельной энергии 10 МДж/кг способствовала уменьшению размеров частиц в ~ 2 раза (исходный пик ~ 48 мкм, после ВЭР ~ 25 мкм). Увеличение удельной энергии обработки до 20 МДж/кг к значительным изменениям не привело.

Известно, что наряду с процессом диспергирования металлов в дисперсной системе «металл – вода» при ВЭР неизбежно развиваются окислительные процессы [16]. Использование углеводородной жидкости в отличие от воды позволяет избежать окисления частиц обрабатываемого металла. Отли-

чительной особенностью ВЭР в углеводородной среде является ее деструкция (разрыв цепочек связей) под воздействием температуры плазменного канала разряда и импульсного давления с образованием активных наночастиц различных аллотропных модификаций углерода [17, 18], что позволяет обеспечить условия для синтеза металл-углеродных соединений.

Термодинамический анализ системы углеводородная жидкость (керосин) – порошковая смесь позволил установить наиболее вероятный состав порошковой смеси после ВЭР воздействия. Так, для порошковой смеси Fe–Ti–B₄C возможно образование следующих составов (в порядке уменьшения массовой доли): остаточные непрореагировавшие Ti и Fe, TiC (наибольший приоритет реакций образования), TiB и TiB₂, FeTi и Fe₂Ti, Fe₃C, FeB и Fe₂B (достаточно малые количества), следы TiH₂; а также вероятно небольшое количество остаточного углерода (который образуется при пиролизе керосина). Применение термодинамического анализа позволило обосновать условия для протекания химических превращений. В частности, в рабочей камере реактора необходимо обеспечить многократное попадание всей смеси в канал разряда и околоразрядную зону. Условия для протекания реакций создаются и в микроплазменных каналах между частицами порошка, по которым проходит ток.

Обработка индивидуальных порошков железа, титана и их смесей, в том числе с карбидом бора, (75 % Fe + 20 % Ti + 5 % B₄C, 75 % Fe + 25 % Ti и 20 % Fe + 80 % Ti) выполнялась в керосине при увеличении удельной энергии воздействия от 10 МДж/кг до 40 МДж/кг и скорости нарастания тока от 12 до 28 ГА/с. ВЭР обработка порошка состава 20 % Fe + 80 % Ti при $W_{уд} = 40$ МДж/кг и $di/dt = 28$ ГА/с приводит к интенсивному измельчению частиц (~ 41 % лежит в области частиц размером 1,4 мкм, а ~ 43 % имеет размер менее 0,3 мкм), изменению их морфологии (исходные частицы округлой формы с фактором формы по Салтыкову $\Phi \sim 0,65$ изменяют форму на сферическую $\Phi \sim 0,9$) и увеличению значения удельной поверхности (со 120 до ~ 1100 см²/г), что способствует их активации. Для всех индивидуальных порошков железа, титана, и смесей 75 % Fe + 20 % Ti + 5 % B₄C, 75 % Fe + 25 % Ti результаты ВЭР обработки аналогичны.

Добавка в керосин ПАВ (НМК-РХ или Катапина) подобно описанным выше результатам обработки алмазных микропорошков увеличивает количество частиц с размером менее 1 мкм – пик распределения (46 %) соответствует размеру ~ 0,5 мкм. Установлено, что плотность тока в проводящем канале (j_k), который формируется в слое порошков, является одним из факторов, влияющих на процессы измельчения и карбидизации. Так, увеличение плотности тока в проводящем канале от ~ 0,21 до 1,48 кА/мм² при обработке порошка Ti способствует увеличению в два раза количества частиц менее 1 мкм. При максимальной плотности тока 1,48 кА/мм² в проводящем канале образуется максимальное (массовая доля более 40 %) количество частиц в диапазоне от 0,1 до 1 мкм, из которых ~ 60 % составляет карбид титана (см. рис. 3, 4) [19, 20].

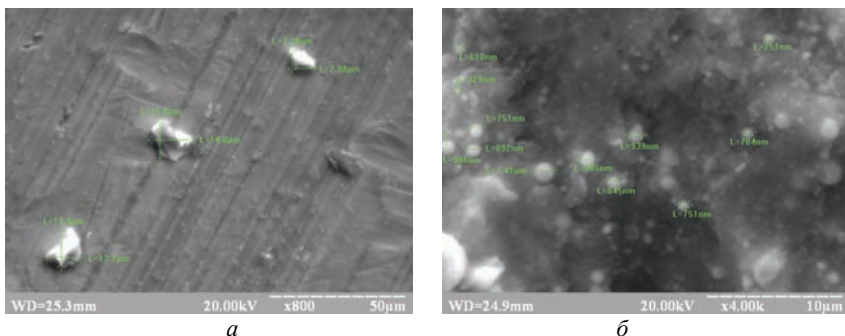


Рисунок 3 – Микроэлектронные фотографии порошка Тi до и после обработки $W_{уд} = 40$ Мдж/кг: а – исходный, увеличение $\times 800$; б – после ВЭР, увеличение $\times 4000$

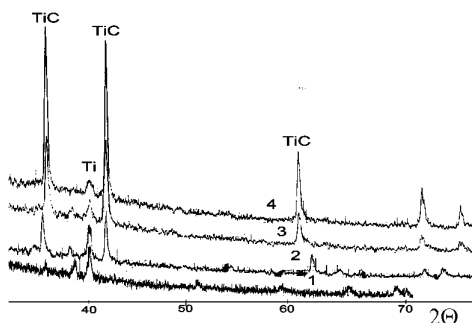


Рисунок 4 – Дифрактограммы исходного порошка Тi до и после его ВЭР обработки при разных значениях плотности тока в канале разряда: 1 – исходный порошок Тi; 2 – порошок Тi после ВЭР обработки при $j_k=0,08$ кА/мм²; 3 – $j_k=0,25$ кА/мм²; 4 – $j_k=0,56$ кА/мм²)

Для исследования влияния РИТ обработки порошков (на примере смеси 75 % Fe + 20 % Ti + 5 % В₄С) на изменение физико-механических свойств консолидированных материалов было выполнено их искро-плазменное спекание (ИПС). Консолидация проводилась при скорости нагрева 100 °С/мин (1,65 °С/с), времени выдержки 120 с при температуре 820 °С и давлении 60 МПа. После ИПС для устранения ликвации, то есть неоднородности химического состава внутри отдельных зерен или в объеме сплава, был применен отжиг при температуре 850 °С. Далее проводилась закалка при 870 °С с охлаждением в воде и низкотемпературный отпуск при 180–200 °С для устранения внутренних напряжений.

Образцы карбидосталей системы Fe–Ti–В–С имеют мелкозернистую структуру, упрочненную тугоплавкими соединениями TiC, TiB, TiB₂ (рис. 5, а). Плотность образцов близка к теоретической, а твердость составляет 53 HRC. После термообработки образцы сохранили мелкозернистую струк-

туру с равномерно распределенными упрочняющими фазами (рис. 5, б). Микротвердость светлой фазы (упрочняющей) – 16,48 ГПа, темной (матрицы) – 9,27 ГПа, что соответствует мартенситу отпуска, а твердость образцов составляет 68 HRC. Применение РИТ обработки порошков позволило получить и сохранить размер упрочняющих структур карбидов и боридов в составе полученных образцов. Это значительно повлияло на их механические характеристики: прочность на изгиб составила $\sigma_{\max} \approx 1350$ МПа, износостойкость при абразивном износе $m_{\text{изн}} \approx 51$ мкм/км, что превышает характеристики закаленной дисперсноупрочненной быстрорежущей стали Р6М5, твердость которой 60 HRC, прочность на изгиб 1100 МПа, а износостойкость $m_{\text{изн}} \sim 61$ мкм/км [21].

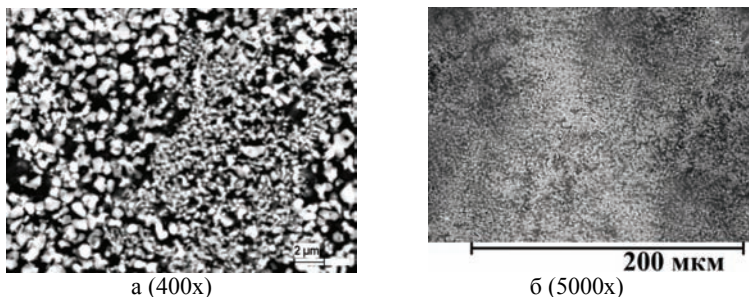


Рисунок 5 – Микроструктуры композиции Fe–Ti–B–C (а – после ИПС; б – после термообработки)

Выводы. Рассмотрены возможности разрядно-импульсной технологии обработки порошков разного состава с целью их диспергирования, активации, инициации структурно-фазовых превращений, синтеза порошковой шихты для создания в итоге материалов с повышенными физико-механическими и функциональными свойствами.

Достижение скорости нарастания тока в исследуемых режимах от 11 до 30 ГА/с при обеспечении удельной энергии обработки от 10 до 40 МДж/кг позволяет осуществить эффективное диспергирование и активацию поверхности для всех представленных порошков (твердых и сверхтвердых материалов и металлов). Добавка в рабочей жидкости растворов ПАВ интенсифицирует воздействие ВЭР обработки на порошки.

Обработка порошков металлов в керосине позволяет, помимо диспергирования и активации, осуществлять направленный синтез шихты прогнозируемого состава с дисперсными упрочняющими частицами карбидов и боридов. При этом увеличение плотности тока в канале разряда от 0,21 до 1,48 кА/мм² приводит к увеличению дисперсности и содержания упрочняющих частиц.

Образцы карбидостали, консолидированные из шихты, синтезированной методом РИТ обработки порошков, имеют повышенные физико-

механические свойства по сравнению со стандартными быстрорежущими сталями.

- Список литературы. 1.** Материалы и технологии // Неорганическое материаловедение. Энциклопедическое изд. : в 2 т. / Под ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода. – К. : Наукова думка, 2008. – Т. 2, кн. 1. – 856 с. **2.** *Chokshi H.* On the validity of the Hall-Petch relationship in nanocrystalline materials / *H. Chokshi, A. Rosen, J. Karch* [et al] // Scripta Metallurgica. – 1989. – Vol. 23, Issue 10. – P. 1679 – 1683. **3.** *Морозов А. П.* Перспективные сверхмелкозернистые твердые сплавы типа WC-Co / *А. П. Морозов* // Технология неорганических веществ и материалов. – 2005. – № 11. – С. 87–90. **4.** *Скороход В. В.* Химические, диффузионные и реологические процессы в технологии порошковых материалов / *В. В. Скороход, Ю. М. Солонин, И. В. Уварова.* – К. : Наукова думка, 1990. – 248 с. **5.** *Андриевский Р. А.* Порошковое материаловедение / *Р. А. Андриевский.* – М. : Металлургия, 1991. – 207 с. **6.** *Koch C. C.* Top-down synthesis of nanostructured materials : mechanical and thermal processing methods / *C. C. Koch* // Reviews on Advanced Materials Science. – 2003. – No. 5. – P. 91–99. **7.** *Сизоненко О. Н.* Модифицирующее влияние импульсных высоковольтных разрядов на активность растворов поверхностно-активных веществ / *О. Н. Сизоненко, Э. И. Тафтай, Р. И. Малая* [и др.] // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2008. – № 44 – С. 137–146. **8.** *Сизоненко О. Н.* Электроразрядный синтез наноразмерных металл-углеродных композиционных порошков / *О. Н. Сизоненко, Г. А. Баглюк, А. И. Райченко* [и др.] // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. Збірник наукових праць. – К.: 2012. – Т. 10, вип. 1. – С. 135–144. **9.** *Sizonenko O. N.* Variation in the particle size of Fe–Ti–BaC powders induced by high-voltage electrical discharge / *O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, A. I. Raichenko* [et al] // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2012. – Vol. 51, Issue 3. – P. 129–136. **10.** *Горелик С. С.* Рентгенографический и электроннооптический анализ / *С. С. Горелик.* – Изд. 2-е. – М. : Металлургия, 1970. – 336 с. **11.** Пат. 101575 Україна, МПК B22F 3/14, B22F 3/105, B30B 15/02. Пристрій для іскроплазмового спікання порошків / *Сизоненко О. М., Івлев А. І., Райченко О. І.* [та ін.]. – № 201200957; заявл. 30.01.2012; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7. **12.** *Богатырева Г. П.* Влияние обработки высоковольтным электрическим разрядом на морфометрические характеристики алмазных порошков / *Г. П. Богатырева, О. Н. Сизоненко, Н. А. Олейник* [и др.] // Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАНУ. Сборник научных трудов. Выпуск № 14 «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления». – К.: 2011. – С. 272 – 277. **13.** Пат. 49909 Україна, МПК B24D 3/06, C01B 31/06. Спосіб виготовлення мікропорошків надтвердого матеріалу / *Богатырева Г. П., Майстренко А. Л., Сизоненко О. М., Олійник Н. О.* [та ін.]. – № 200913969; заявл. 30.12.2009; опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9. **14.** *Богатырева Г. П.* Высоковольтный электрический разряд в жидкости как метод воздействия на основные характеристики микропорошков кубического нитрида бора / *Г. П. Богатырева, А. Л. Майстренко, О. Н. Сизоненко* [и др.] // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – Вип. 40. – С. 27–32. **15.** Пат. 98520 Україна, МПК B02C 19/18, B22F 9/14. Спосіб одержання тонкодисперсних металевих порошків / *Сизоненко О. М., Тафтай Е. І., Райченко О. І.* [та ін.] – № a201008652; заявл. 12.07.2010; опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10. **16.** *Журавков С. П.* Исследование физико-химических процессов при электроискровой обработке металлических загрузок в водных растворах / *С. П. Журавков, Г. Л. Лобанова, Н. А. Яворовский* [и др.] // Сб. трудов международной научной конференции «Становление и развитие научных исследований в высшей школе» [посвящ. 100-летию со дня рождения проф. А. А. Воробьева], Томск, 14 – 16 сентября 2009. – Томск : ТПУ, 2009. – Т. 2. – С. 288–293. **17.** *Богуславский Л. З.* Электровзрывной метод получения фуллеренов / *Л. З. Богуславский* [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2002. – № 4. – С. 30–34. **18.** Пат. 77370 Україна, МПК C01B 31/06. Спосіб одержання порошку синтетичного ультрадисперсного алмазу / *Вовченко О. І., Городян В. І., Кускова Н. І.* [та ін.]; заявник і патентовласник ППТ НАН України. – №200512866; заявл. 30.12.05; опубл. 15.11.06, Бюл. № 3. **19.** *Sizonenko O. N.* Dispersion and Carburization of Titanium Powders by Electric Discharge / *O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, E. I. Taftai* [et al] // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2013. – Vol. 52, Issue 5. – P. 247–253.

20. Пат. 97890 Україна, МПК С01В 31/30, В01J 3/06, В22F 9/14, В82В 3/00. Спосіб одержання карбідів металів перехідної групи / Сизоненко О. М., Тафтай Е. І., Райченко О. І. [та ін.]. – № а201011723; заявл. 04.10.2010; опубл. 26.03.2012, Бюл. № 6. 21. Сизоненко О. М. Отримання карбідосталей системи Fe–Ti–B–C з використанням високовольного розряду в рідині для підготовки шихти / О. М. Сизоненко, С. Г. Григорьев, А. Д. Зайченко [та ін.] // Наукові нотатки. Міжзв'язський збірник. Вип. 42. – Луцьк, 2013. – С. 254–261.

Bibliography (transliterated): 1. Gnesin, G. G., and V. V. Skorohod, eds. "Materialy i tehnologii." Neorganicheskoe Materialovedenie. Vol. 2. Kiev: Naukova Dumka, 2008. Print. 2. Chokshi H. et al. "On the validity of the Hall-Petch relationship in nanocrystalline materials" Scripta Metallurgica. Vol. 23, Issue 10. 1989. 1679–1683. Print. 3. Morozov, A. P. "Perspektivnye sverhmelkozernistye tverdye splavy tipa WC–Co." Tehnologija neorganicheskikh veshhestv i materialov 11 (2005): 87–90. Print. 4. Skorohod, V. V., Ju. M. Solonin, and I. V. Uvarova. Himicheskie, diffuzionnye i reologicheskie processy v tehnologii poroshkovykh materialov. Kiev: Naukova dumka, 1990. Print. 5. Andrievskij, R. A. Poroshkovoe materialovedenie. Moscow: Metallurgija, 1991. Print. 6. Koch, C. C. "Top-down synthesis of nanostructured materials: mechanical and thermal processing methods." Reviews on Advanced Materials Science 5 (2003): 91–99. Print. 7. Sizonenko, O. N. et al. "Modificirujushhee vliyanie impul'snykh vysokovol'tnykh razrjadov na aktivnost' rastvorov poverhnostno-aktivnykh veshhestv." Visnyk NTU "KhPI". No. 44. 2008. 57–62. Print. 8. Sizonenko, O. N. et al. "Jelektrozrazjadnyj sintez nanorazmernih metall-uglerodnykh kompozicionnykh poroshkov." Nanosystemy, nanomaterialy, nanotekhnolohiyi. Zbirnyk naukovykh prats'. Vol. 10. Issue 1. 2012. 135 – 144. Print. 9. Sizonenko, O. N. et al. "Variation in the particle size of Fe–Ti–B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge" Powder Metallurgy and Metal Ceramics. Vol. 51, Issue 3. 2012. 129 – 136. Print. 10. Gorelik, S. S. Rentgenograficheskij i jelektronnoopticheskij analiz. Moscow: Metallurgija, 1970. Print. 11. Syzonenko, O. M. et al. Device of spark-plasma sintering powders. Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, assignee. Patent of Ukraine 101575. 10 April 2013. Print. 12. Bogatyreva, G. P. et al. "Vliyanie obrabotki vysokovol'tnym jelektricheskim razrjadom na morfometricheskie harakteristiki almaznykh poroshkov" Porodorazrushajushhij i metalloobrabatvujushhij instrument – tehnika i tehnologija ego izgotovlenija. 14. 2011. Kiev. 272–277. Print. 13. Bohatyriova, H. P. et al. Method of producing micropowders of superhard materials. V. Bakul Institute of Superhard Materials of National Academy of Sciences of Ukraine et al, assignee. Patent of Ukraine 49909. 11 May 2010. Print. 14. Bogatyreva, G. P. et al. "Vysokovol'tnyj jelektricheskij razrjad v zhidkosti kak metod vozdejstvija na osnovnye harakteristiki mikroporoshkov kubicheskogo nitrida bora" Prohresy vni tehnolohiyi i systemy mashynobuduvannya: Mizhnarodnyy zb. naukovykh prats'. 40. 2010. Donets'k. 27–32. Print. 15. Syzonenko, O.M. et al. Method for producing fine metal powders. Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, assignee. Patent of Ukraine 98520. 25 May 2012. Print. 16. Zhuravkov S. P. et al. "Issledovanie Fiziko-himicheskikh Processov Pri Jelektroiskrovoj Obrabotke Metallicheskikh Zagruzok v Vodnyh Rastvorah." Proc. of Stanovlenie i razvitie nauchnykh issledovanij v vysshej shkole. Tomsk: TPU, 2009. 288–293. Print. 17. Boguslavskij L. Z. et al. "Jelektrozryvnoj metod poluchenija fullerenov." Jelektronnaja obrabotka materialov 4 (2002): 30–40. Print. 18. Vovchenko, O. I. et al. Method for preparing powder of synthetic ultradisperse diamond. Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, assignee. Patent of Ukraine 77370. 15 November 2006. Print. 19. Sizonenko, O. N. et al. "Dispersion and Carburization of Titanium Powders by Electric Discharge." Powder Metallurgy and Metal Ceramics. Vol. 52, Issue 5. 2013. 247–253. Print. 20. Syzonenko, O.M. et al. Process for the preparation of metal carbides of transition group. Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, assignee. Patent of Ukraine 97890. 26 March 2012. Print. 21. Syzonenko, O. M. et al. "Otrymannya karbidostaley systemy Fe–Ti–B–C z vykorystannjam vysokovol'tnoho rozryadu v ridyni dlya pidhotovky shykty." Naukovi notatky. Mizhvuziv's'kyi zbirnyk. 42. 2013. Luts'k. 254–261. Print.

Поступила (received) 14.10.2014

УДК 621.762.3 : 544.556.1 : 537.52

Розрядно-імпульсна технологія обробки порошків / А. Д. Зайченко, О. Н. Сизоненко, Е. М. Шерегий, Е. В. Липян, А. С. Торпаков, Н. С. Присташ, В. А. Трегуб // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 73-81. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто можливості розрядно-імпульсної технології обробки порошків різного складу з метою їхнього диспергування, активації, ініціації структурно-фазових перетворень, синтезу порошкової шихти для створення в результаті матеріалів з підвищеними фізико-механічними властивостями. Для досліджуваних порошків металів, твердих і надтвердих матеріалів встановлено режими обробки, що забезпечують потрібний рівень дисперсності та необхідний фазовий склад.

Ключові слова: високовольтний електричний розряд, дисперсна система, диспергування, активація, синтез, модифікація поверхні, порошки, карбиди металів, алмази, тверді сплави, карбід кремнію, карбід бора.

УДК 621.762.3 : 544.556.1 : 537.52

Разрядно-импульсная технология обработки порошков / А. Д. Зайченко, О. Н. Сизоненко, Е. М. Шерегий, Е. В. Липян, А. С. Торпаков, Н. С. Присташ, В. А. Трегуб // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 73-81. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрены возможности разрядно-импульсной технологии обработки порошков разного состава с целью их диспергирования, активации, инициации структурно-фазовых превращений, синтеза порошковой шихты для создания материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Для исследуемых порошков металлов, твердых и сверхтвердых материалов установлены режимы обработки, обеспечивающие требуемый уровень дисперсности и необходимый фазовый состав.

Ключевые слова: высоковольтный электрический разряд, дисперсная система, диспергирование, активация, синтез, модификация поверхности, порошки, карбиды металлов, алмазы, твердые сплавы, карбид кремния, карбид бора.

Pulsed-discharge technology of powders treatment / A. D. Zaichenko, O. M. Syzonenko, E. M. Sheregii, Y. V. Lypian, A. S. Torpakov, N. S. Prystash, V. A. Tregub // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – С. 73-81. – Bibliogr.: 21. – ISSN 2079-0740.

The scopes of pulsed-discharge technology of powders of different composition treatment with means of their dispersion, activation, initiation of initiation of structural phase transitions for creation of materials with high mechanical properties are considered. Treatment regimens that provide a required level of dispersion and the desired phase composition have been established for studied metal, hard and superhard materials powders.

Keywords: high voltage electric discharge, disperse environment, dispersion, activation, synthesis, surface modification, powders, metal carbides, diamonds, hard alloys, silicon carbide, boron carbide.