

**Заключение.** При обработке валков станов холодной прокатки полосового металла электрическими импульсными разрядами с использованием универсальных станков серии СЭИ достигается нанесение на их рабочие поверхности матового изотропного микрорельефа с высокими качественными и эксплуатационными характеристиками.

*Поступила 02.09.04*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Малкин А.Я. Жидкостное полирование и его применение в промышленности. М., 1952.
2. Беляковский М.Е., Ширинская С.А., Фирсов П.А. Микрогеометрия валков и холоднокатаной ленты // *Металлург.* 1969. С. 31–32.
3. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. М., 1981.
4. Усенко Ю.И., Иванов В.И., Нестеренко Т.Н., Грицай В.П. Импульсная электротепловая обработка поверхности прокатных валков // *Прогрессивные технологии машиностроения и современность.* Донецк, 1997.

#### Summary

It is offered the technology of electric discharge treatment in the impuls regime of the cast rollers working surface, which, from one side, allows to create on the surface of treatment mikrorelef with the prescribed parameters of roughness, and, with other, to give the substantial consolidating for the superficial layer of metal for the workshops of steel bar cold rolling and strip of a number of metallurgical plants of NIS countries. It is developed, made and passed the successful industrial tests the universal equipment for realization of the developed technology. Possibility of the choice of treatment regimes for surface rollers in the wide range of electric parameters allows due to the receipt of rational values of roughness and compactness of microbulges on the bar surface to secure a minimum expense of coverages materials with high their quality.

---

М.И. Дворник, А.Д. Верхотуров, Т.Б. Ершова, В.И. Палажченко

## ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА НА СОСТАВ ПОРОШКА, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК8 В ВОДЕ

*Институт материаловедения Хабаровского Научного центра  
Дальневосточного отделения Российской Академии наук,  
ул. Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск, Россия*

#### Введение

Современная промышленность широко использует твердые сплавы типа ВК, ТК [1]. Сокращение запасов кондиционного сырья и высокая стоимость вызывают необходимость поиска путей рециркуляции сплавов из отходов, образующихся в процессе производства изделий из твердых сплавов и при их эксплуатации. По расчетам специалистов при сохранении темпов развития промышленности и отсутствии новых месторождений вольфрама, его запасов хватит на 15–20 лет [2]. Поэтому уже сейчас в мире перерабатывается около 30% твердого сплава.

Основной проблемой переработки твердого сплава является его измельчение. Одним из перспективных методов получения порошка из компактных отходов является метод электроэрозионного диспергирования, впервые предложенный Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко в 1943 году [3]. Работы по диспергированию различных материалов продолжены в 70–90 годы XX века в Институте неорганической и физической химии АН Киргизской ССР и в НПО «Тулачермет» [4, 5]. Возрастает интерес к

---

© Дворник М.И., Верхотуров А.Д., Ершова Т.Б., Палажченко В.И., *Электронная обработка материалов*, 2005, № 2, С. 14–19.

методу со стороны исследователей в США [6], Аргентине [5]. К основным преимуществам электроэрозионного диспергирования относятся следующие: возможность диспергирования любых токопроводящих материалов, получение частиц преимущественно сферической формы размером от нескольких нанометров до 100 мкм [6], порошка за одну операцию, невысокая стоимость и отсутствие механического износа оборудования, безвредность и экологическая чистота производства. Тем не менее применение данного метода для переработки твердых сплавов сталкивается с трудностями, вызванными отсутствием информации об основных зависимостях между энергетическими параметрами искровых разрядов и гранулометрическим, морфологическим, химическим, фазовым составами порошка, полученного диспергированием твердого сплава. Поэтому цель данной работы – изучение влияния параметров искрового разряда на гранулометрический, морфологический, фазовый и химический составы порошка, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава ВК8 в воде.

### Методика эксперимента

Схема установки для получения порошка представлена на рис. 1. В сосуд с дистиллированной водой помещен катод (ВК8), сверху находится анод (ВК8), установленный на вибраторе. Через генератор импульсов на электроды подаются импульсы напряжения ( $U_{xx} = 40-70$  В) частотой 400–2450 Гц одновременно с работой вибратора. Между анодом и катодом происходят разряды, электрические параметры (напряжение и ток) которых фиксируют с помощью АЦП, входящего в состав измерительного комплекса, разработанного в Институте материаловедения ХНЦ ДВО РАН [7]. Частота дискретизации регистрируемого сигнала составляет 100 кГц. По полученным данным рассчитаны энергии в импульсе на всех исследуемых режимах. Полученный порошок отстаивался в сосуде, затем высушивался в сушильном шкафу.

Массу анода и катода определяли с помощью аналитических весов ВЛР-200. Фазовый анализ состава полученного порошка проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М. Содержание углерода в полученном порошке измеряли с помощью анализатора АН-7520. Дериватографический анализ осуществляли на дериватографе Q-1000°C системы E. Paulik, J. Paulik, L. Erdey, микроскопические исследования полученных порошков – на электронном микроскопе LEO-1420. Спектральный анализ проводили на энергодисперсионном спектрометре RONTES, рентгеноспектральном микроанализаторе MAP-3 и рентгенофлуоресцентном анализаторе СПЕКТРОСКАН, гранулометрический состав порошка исследовали на микроскопе БИОЛАН-М.

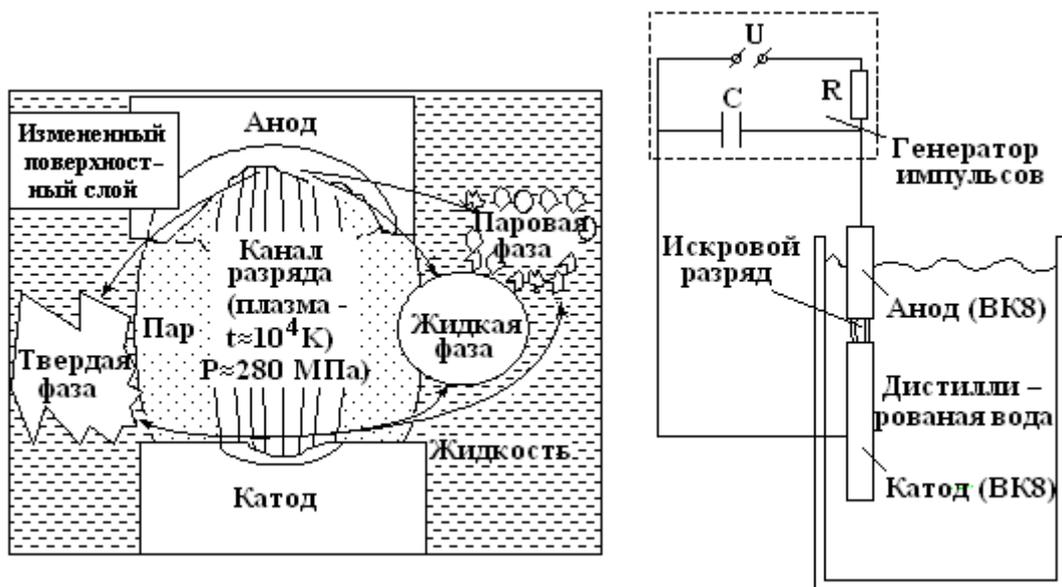


Рис. 1. Схема электроэрозионного процесса

### Результаты и обсуждение

Установлено, что эрозия анода и катода напрямую зависит от частоты разрядов между анодом и катодом (рис. 2). Это подтверждает принцип аддитивности эрозии электродов, высказанный Б.Р. Лазаренко [3], при соблюдении которого за каждый отдельный импульс эродирует в среднем равное количество материала.

Исследования эрозии анода и катода от энергии импульса при различных длительностях импульсов показали, что в исследуемом диапазоне с увеличением энергии импульса эрозия анода увеличивается независимо от длительности импульса (рис. 3).



Рис. 2. Зависимость эрозии анода и катода от частоты импульсов при средней энергии импульсов  $E = 0,1$  Дж, длительности импульсов  $\tau = 60$  мкс; 1, 2 – удельная эрозия анода и катода соответственно

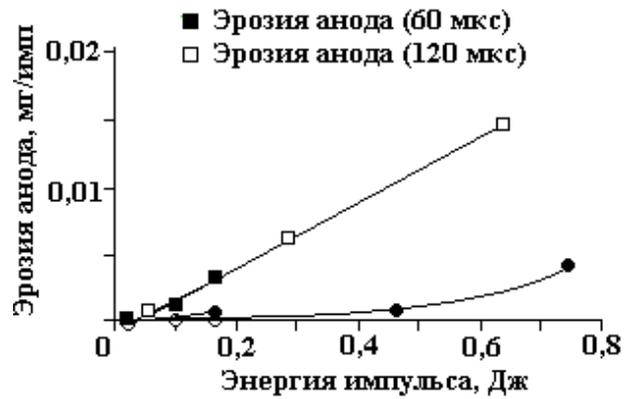


Рис. 3. Зависимость эрозии анода и катода от энергии и длительности импульсов (частота 500 Гц)

Полученный порошок имеет широкий диапазон распределения частиц по размерам от ультрадисперсных до отдельных частиц размером 30 мкм. Порошок состоит из частиц преимущественно сферической формы, некоторые из них полые (рис. 4). В порошке присутствует большое количество слипшихся ультрадисперсных частиц. Порошок содержит незначительное количество частиц исходного твердого сплава, полученных хрупким разрушением.

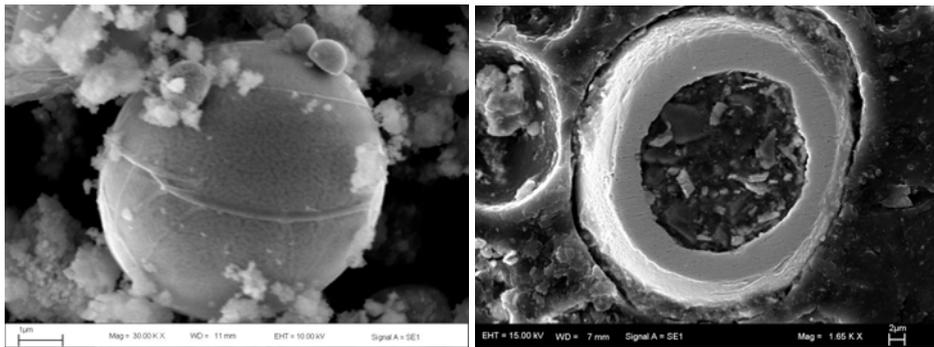


Рис. 4. Морфология и внутреннее строение сферических частиц

Исследования показали, что с увеличением энергии импульса средний арифметический диаметр частиц увеличивается (рис. 5). Это связано с тем, что при меньшей энергии импульса градиент температур выше, следовательно, доля материала, образующегося кристаллизацией паровой фазы больше [9]. На фотографиях видно, что с увеличением энергии импульса количество паровой фазы, которая облепляет сферические частицы жидкой фазы, уменьшается (рис. 6).

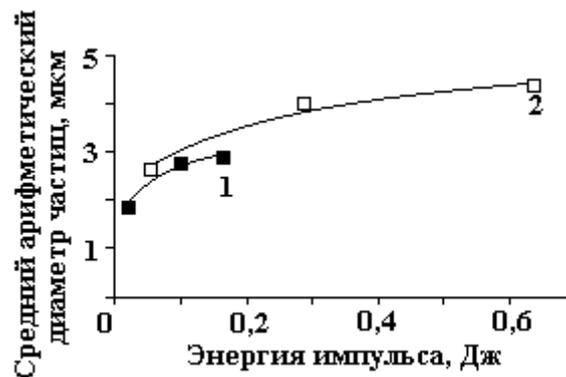
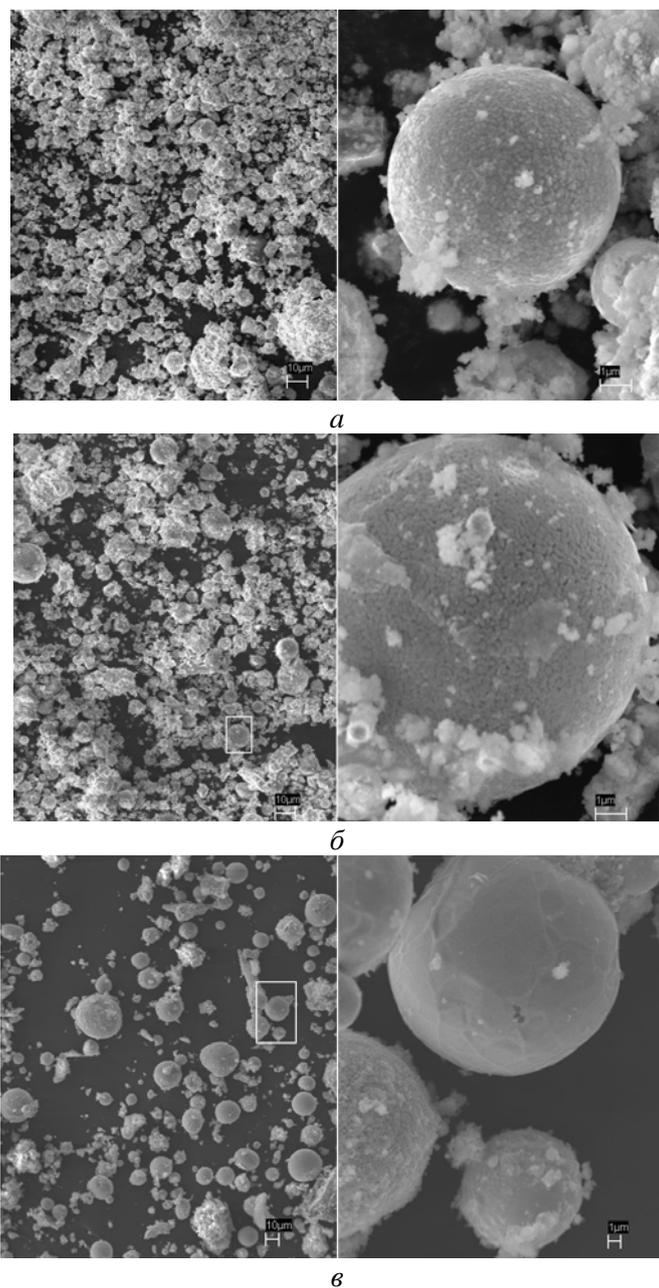


Рис. 5. Зависимость среднего арифметического диаметра частицы от энергии и длительности импульса (1 – 60; 2 – 120 мкс)



а  
б  
в

Рис. 6. Размеры и морфология частиц порошка, полученного при энергиях импульса (а)  $E = 0,06$  Дж, (б)  $E = 0,29$  Дж, (в)  $E = 0,64$  Дж. Длительность импульса  $\tau = 120$  мкс

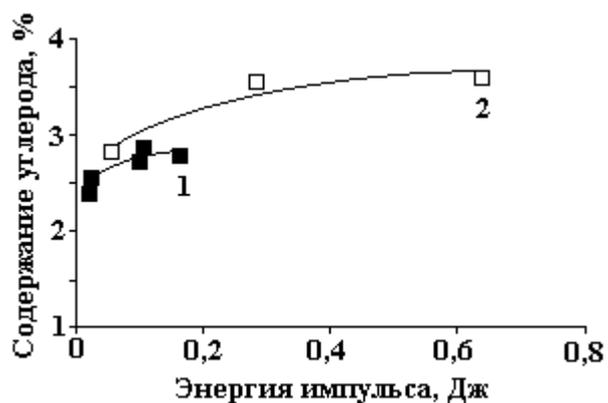


Рис. 7. Зависимость содержания углерода в полученном порошке от энергии импульса при различных длительностях импульса (1 – 60; 2 – 120 мкс)

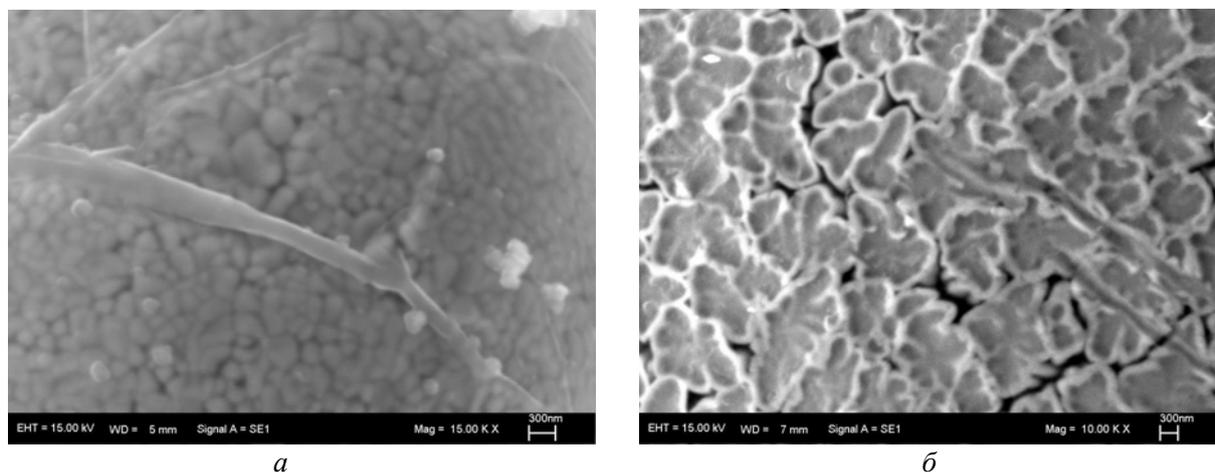
Порошки, высушенные при комнатной температуре, содержат 4–5% воды, которая адсорбирована на поверхности, в порах и внутренней поверхности полых частиц и удаляется при 250–300°C. Фазовый состав порошков, полученных при различных энергиях и длительностях импульса, следующий:  $\alpha - W$ ,  $\beta - W$ ,  $W_2C$ ,  $\beta - WC$ ,  $\beta - Co$ ,  $Co_x W_y C_z$ . Спектральный анализ показал,

что в порошках содержится 91,5% вольфрама и 8,5% кобальта, что соответствует изначальному содержанию металлов в сплаве ВК-8. Сферические частицы состоят из смеси кобальта и вольфрама в соотношении W – 90–95%, Co – 5–10%. На поверхности сферических и среди ультрадисперсных частиц содержание кобальта увеличивается до 30–46%.

Содержание углерода в порошке увеличивается от 2,7 до 3,5% в зависимости от энергии импульса (рис. 7). То есть более половины изначального углерода, который содержится в карбиде вольфрама (5,8%), переходит в CO<sub>2</sub>.

#### Обсуждение результатов

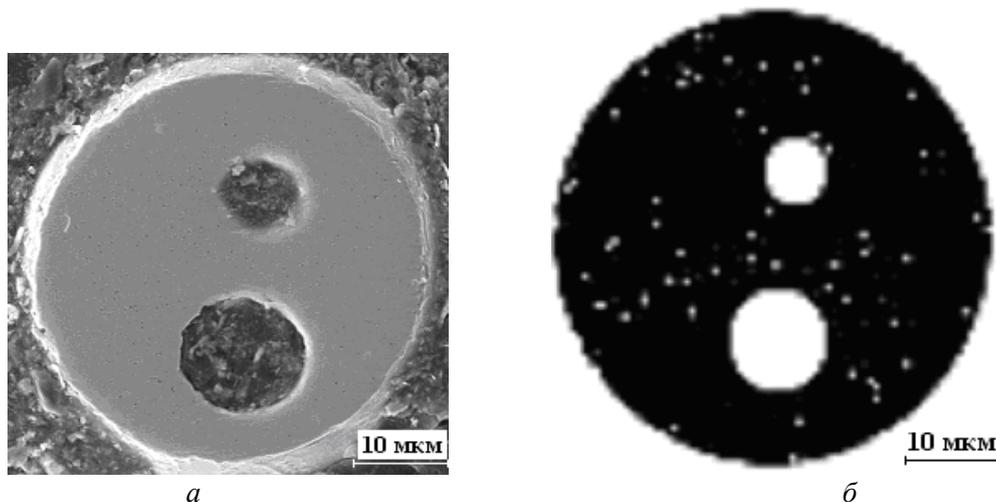
В условиях искрового разряда ( $T \approx 10^4$  К,  $P \leq 280$  МПа) [6] с твердым сплавом последовательно происходят следующие процессы: фаза  $\alpha$ -WC нагревается до температуры плавления вольфрама (3410°C) и выше. Капли расплавленного твердого раствора W+C выбрасываются из лунки и обезуглероживаются под воздействием ионов кислорода и водорода; быстрое охлаждение в воде со скоростью  $10^6$ – $10^9$  К/с [6, 9] приводит к кристаллизации с образованием фаз  $\alpha$ ,  $\beta$ -W,  $\beta$ -WC, W<sub>2</sub>C. Поверхность частиц покрывается оксидами, концентрирующимися на границах зерен (рис. 8). Быстрое охлаждение предотвращает дальнейшее окисление частиц. Содержание оксидов остается меньше чувствительности рентгеновского дифрактометра. Внутренние полости в таких частицах образуются, когда часть паров жидкости не успевает покинуть частицу и остается внутри (рис. 4). Кобальт, заполняющий пространство между зёрнами WC, плавится при 1495°C и кипит при 2960°C, в результате он кристаллизуется частично внутри сферических (рис. 9) и в большем соотношении в ультрадисперсных частицах.



а

б

Рис. 8. Морфология поверхностей сферических частиц порошка, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава ВК8



а

б

Рис. 9. Фотография сечения сферической частицы (а). Распределение вольфрама и кобальта по сечению сферической частицы (б)(вольфрам – черный, кобальт – белый)

## Выводы

В результате исследований подтвержден механизм образования сферических (жидкая фаза) и ультрадисперсных частиц (паровая фаза) под действием электроискрового разряда, заключающийся в выбрасывании из лунки расплавленного и кипящего материала, который быстро кристаллизуется при взаимодействии с окружающей средой. Увеличение энергии импульсов от 0,02 до 0,64 Дж приводит к увеличению эрозии электродов от 0,00014 до 0,015 мг/имп по линейному закону и увеличению среднего размера частиц от 1,87 до 4,31 мкм, при этом увеличение длительности импульса увеличивает средний размер частиц. Уменьшение среднего размера частиц, вероятно, связано с увеличением доли паровой фазы при уменьшении энергии импульса. Содержание углерода в полученном порошке увеличивается от 2,8 до 3,6% при увеличении энергии импульса от 0,06 до 0,64 Дж (содержание углерода в исходном ВК8 – 5,8%). Увеличение длительности импульса приводит к увеличению содержания углерода. Кобальт равномерно распределен по порошку, его содержание среди ультрадисперсных частиц 30–46%, а в сферических 5–10% (содержание кобальта в исходном сплаве ВК8 – 8%).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 04-03-97001.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Панов В.С., Чувиллин А.М. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. М., 2001.
2. Резниченко В.А., Липихина М.С., Морозов А.А. Комплексное использование руд и концентратов. М., 1989.
3. А.с. 70000 СССР. Способ получения порошков и устройство для его осуществления. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. // Открытия. Изобретения. 1964. № 22. С.120.
4. Марусина В.И., Исхакова Г.А., Филимоненко В.Н., Синдеев В.И. Структура и фазовый состав диспергированного электроискровым методом сплава WC-Co // Порошковая металлургия. 1991. № 5. С. 75–79.
5. Cabanillas E.D., Pasqualini E.E., Lopez M. et al. Morphology and Phase Composition of Particles Produced by Electro-Discharge-Machining of Iron // Hyperfine Interactions. 2001. № 134. P. 179–185.
6. Berkowitz A.E., Hansen M.F., Parker F.T. et. al. Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2003. № 1-6. P. 254–255.
7. Пячин С.А., Маслов Б.Я., Химухин С.Н., Пугачевский М.А. Установка для исследования электрических и оптических параметров импульсных искровых разрядов // Измерительная техника. 2003. № 8. С. 43–46.
8. Марусина В.И., Филимоненко В.Н. Взаимосвязь теплового режима искрового разряда с формой и диапазоном распределения частиц микропорошка карбида вольфрама по размерам // Порошковая металлургия. 1984. № 6. С. 10–14.
9. Полубесов Ю.С., Дмитриев Г.Г., Фоминский Л.П. Расчет скорости охлаждения частиц сферической формы // Металлические порошковые материалы, их обработка и свойства. М., 1985.

Поступила 29.07.04

## Summary

Grain-size and chemical composition of powder obtained by spark erosion of hard alloy VK-8 in water were studied as functions of spark energies ranging from 0.02 to 0.64 J and spark duration ranging from 60 to 120  $\mu$ s. Growth of spark energies results in growth of erosion under the linear law and in growth of arithmetic mean diameter of particles. Carbon contents growth with spark energy. Tungsten and cobalt distribution in obtained particles has been researched.