

УДК 621.891

М. Н. Сафонова, канд. техн. наук<sup>1</sup>; А. А. Федотов<sup>1</sup>,  
А. С. Сыромятникова, канд. физ.-мат. наук<sup>2</sup>, П. П. Тарасов, канд. техн. наук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Россия  
<sup>2</sup>Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, г. Якутск,

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК МИКРО- И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ПРИРОДНОГО АЛМАЗА НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ БРОНЗЫ

*Исследовано влияние добавок алмазных микро- и нанопорошков на физико-механические свойства порошкового сплава. Показано положительное влияние использования алмазных частиц в качестве наполнителей в металлической матрице на свойства и структуру композиционных материалов.*

**Ключевые слова:** порошки природных алмазов, ультрадисперсные порошки, оловянистая бронза, пористость, износостойкость, шероховатость

Перспективными наполнителями для создания композиционных материалов различного функционального назначения являются ультрадисперсные алмазные порошки статического и детонационного синтеза [1, 2]. Введение их в небольшом количестве позволяет улучшить механические и эксплуатационные свойства композитов и использовать их для качественно новых приложений в различных отраслях промышленности. В работе проведено изучение влияния добавок в виде микро- и ультрадисперсных (УД) порошков природных алмазов (ППА) на структуру и свойства композитных материалов на основе металлических сплавов.

Образцы изготавливались из композиционных материалов на основе оловянистой бронзы марки М1 (20% олова, 80% меди). В качестве наполнителя применялись микропорошки природного алмаза зернистостей 3/2, 7/5, -40 мкм и субмикронного размера из природных алмазов месторождений Республики Саха (Якутия); массовое содержание 1–3 %.

Зерновой состав порошков изучался с применением оптического микроскопа «Биолам», морфометрические характеристики – на приборе Dialnspect. OSM и сканирующих электронных микроскопах Philips XL-20 и Jeol JSM-7800F (рис. 1).

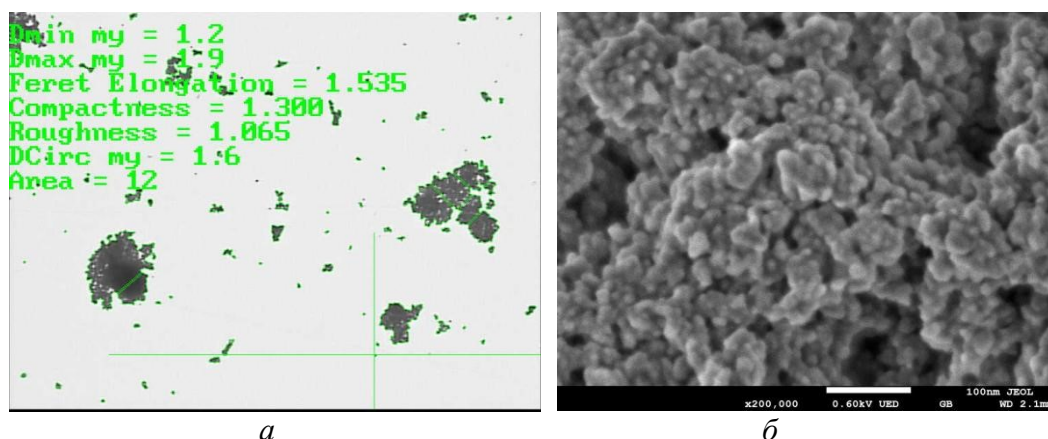


Рис. 1. Ультрадисперсный порошок алмаза: оптическая микроскопия,  $\times 1350$  (а), РЭМ,  $\times 200\,000$  (б)

Триботехнические испытания проводили с применением смазочно-охлаждающей жидкости (воды) на машине трения СМЦ-2 при вращательном движении по схеме цилиндр – диск с нагрузкой 300 Н. Продолжительность испытаний составляла 10 мин, скорость

вращения вала – 300 об/мин (50–60 м/с). Контртелом служил диск с размерами 52×12×10 мм из термообработанной до HRC 50±1 стали 40X.

Плотность композиций  $\rho$  определяли методом гидростатического взвешивания в дистиллированной воде при 20-22°C. Измерения твердости  $H$  проводили на стационарном твердомере *FR-3e* фирмы *Leeco*. Предел пропорциональности при сжатии определяли по диаграммам деформирования, полученным на универсальной испытательной машине *Instron 5940*.

Конечная пористость образцов  $P$  и относительный массовый износ  $\Delta m$  определялись по формулам:

$$P = (1 - \rho/\rho_m) * 100\%, \quad \Delta m = (m_1 - m_2) / m_1 \quad (1)$$

где  $\rho_m$  – расчётная плотность беспористого материала,  $\rho$  – фактическая плотность образца,  $m_1$  – масса образца до испытания,  $m_2$  – масса образца после испытания.

По морфометрическим характеристикам в составе исследованных порошков преобладают зерна осколочной формы, характерных для порошков природного алмаза. Порошки содержат посторонние, преимущественно металлические примеси, наличие которых, однако, не препятствует их использованию в виде упрочняющей фазы в композитных материалах на металлической основе.

Концентрация ультрадисперсных порошков в количестве 1–3% является наиболее оптимальной для получения композиционного материала без уменьшения физико-механических характеристик основы. При более высоких значениях концентрации алмаза происходит ухудшение физико-механических свойств композитов на основе металлического сплава: наблюдается повышение остаточной пористости спеченных композитов из-за графитизации алмазных частиц при высоких температурах спекания.

Результаты исследования физико-механических свойств композитов приведены в таблице. Экспериментальные данные показали, что при добавлении мелкодисперсных алмазных частиц в оловянистую бронзу в количестве 1-3 весовых % достигается повышение плотности, твердости, прочности при сжатии и износостойкости композитов, также уменьшается пористость материалов.

Таблица 1. Свойства оловянистой бронзы М1 и композитов на ее основе

Состав	$P$ , %	$H$ , HRH	$\sigma_{ср}$ , МПа	$\square$ , кг/м <sup>3</sup>	$\Delta m$ , %
М1	41	78	9,7	7560	19,0
М1+1%ППА (3/2)	29	80	10,5	7630	6,2
М1+2%ППА (3/2)	27	80	10,5	7710	5,2
М1+3%ППА (3/2)	25	83	10,2	7730	7,4
М1+1%ППА (7/5)	30	83	11,5	7620	10,1
М1+2%ППА (7/5)	28	80	11,5	7700	8,1
М1+3%ППА (7/5)	28	80	10,5	7720	9,4
М1+1%ППА(-40)	30	84	11,0	7610	6,7
М1+2%ППА(-40)	28	86	12,0	7760	6,0
М1+3% ППА (-40)	27	86	12,1	7770	5,7
М1+1% УД ППА	28	84	11,5	7670	3,4
М1+2% УД ППА	26	87	12,5	7750	2,3
М1+3% УД ППА	26	87	12,2	7750	2,9

С целью определения микроструктуры поверхности образцы были исследованы на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6480LV, атомном силовом микроскопе и на ИК-спектрографе. РЭМ-микроскопия была сделана при увеличении 35-2000 раз при напряжении 5 кВ. По результатам анализа снимков можно утверждать следующее.

На поверхности образцов без УДППА отчетливо видно большое количество пор, распределенных по площади (рис. 2). На образцах с добавкой УДППА количество и размер

пор значительно меньше. (рис. 3). Следовательно, можно утверждать, то, что у образцов без добавки УДПА конечная пористость выше, что еще и подтверждается расчетными данными таблицы 1.

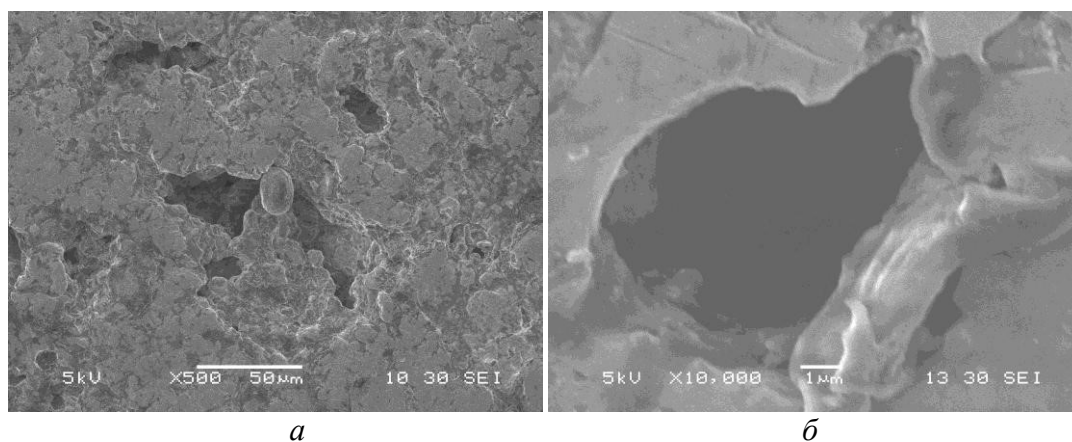


Рис. 2. РЭМ-снимки образца составом М1+6%ППА 315/250: а – при увеличении в 500 раз; б – при увеличении в 10000 раз

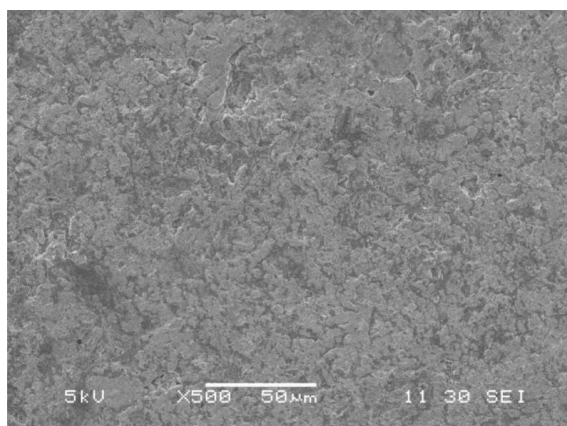


Рис. 3. РЭМ-снимки образца №11 составом М1+6%ППА 315/250 +2%УДПА при увеличении в 500 раз

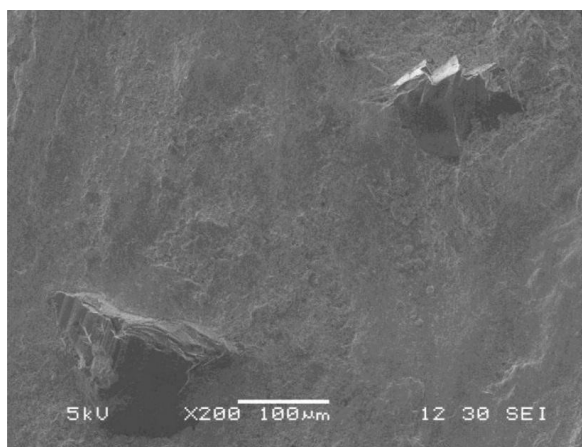


Рис. 4. Поверхность трения композиционного алмазосодержащего материала М1+6%ППА+2%УДПА в после трения

Также на снимках хорошо видны зерна шлифпорошка природного алмаза, выступающие на поверхности (рис. 4). При этом материал связки достаточно плотно обволакивает зерно. На основании этого можно утверждать то, что алмазодержание разрабатываемого материала будет достаточно высоким.

Триботехнические испытания проводились на машине трения ИН 5018 при вращательном движении по схеме палец-диск с нагрузкой 600Н. Наименьший относительный износ показали образцы с составом М1+6%ПА 315/250 +1,2%УДПА (табл. 2).

Таблица 2. Триботехнические испытания образцов

Состав, в мас. %	Масса до испытаний, г ( $m_1$ )	Масса после испытаний, г ( $m_2$ )	Относительный износ КАМ ( $\Delta m$ )	Разница масс, г	Скорость износа, г/час
M1+6%ППА 315/250 (прототип)	4,820	4,814	0,001245	0,006	0,036
M1+6%ППА 315/250+1%УДПА	4,803	4,8	0,000625	0,003	0,018
M1+6%ППА 315/250+2%УДПА	4,822	4,819	0,000622	0,003	0,018
M1+6%ППА 315/250+3%УДПА	4,812	4,808	0,000831	0,004	0,024

Исследуемые образцы цилиндрической формы диаметром 10 мм и высотой 10 мм закреплялись в верхнем держателе машины. На нижний вал устанавливалось контр-тело (обрабатываемый материал). Контр-тела были выполнены в виде дисков 52×16×10 мм. В качестве обрабатываемого материала была выбрана сталь (термообработанная до HRC 50, марки 40X). Продолжительность испытаний составляла 10–20 минут, скорость вращения вала 300 об/мин.

С целью изучения рельефа поверхности трения испытуемых образцов были проведены исследования на атомном силовом микроскопе Integra Spectra NT-MDT. На основе моделей поверхности образцов (рис.5, 6) были исследованы параметры шероховатости. Для этого были сделаны профили поверхностей по осям x и y, в сечениях имеющих наибольшие экстремумы по на снимках.

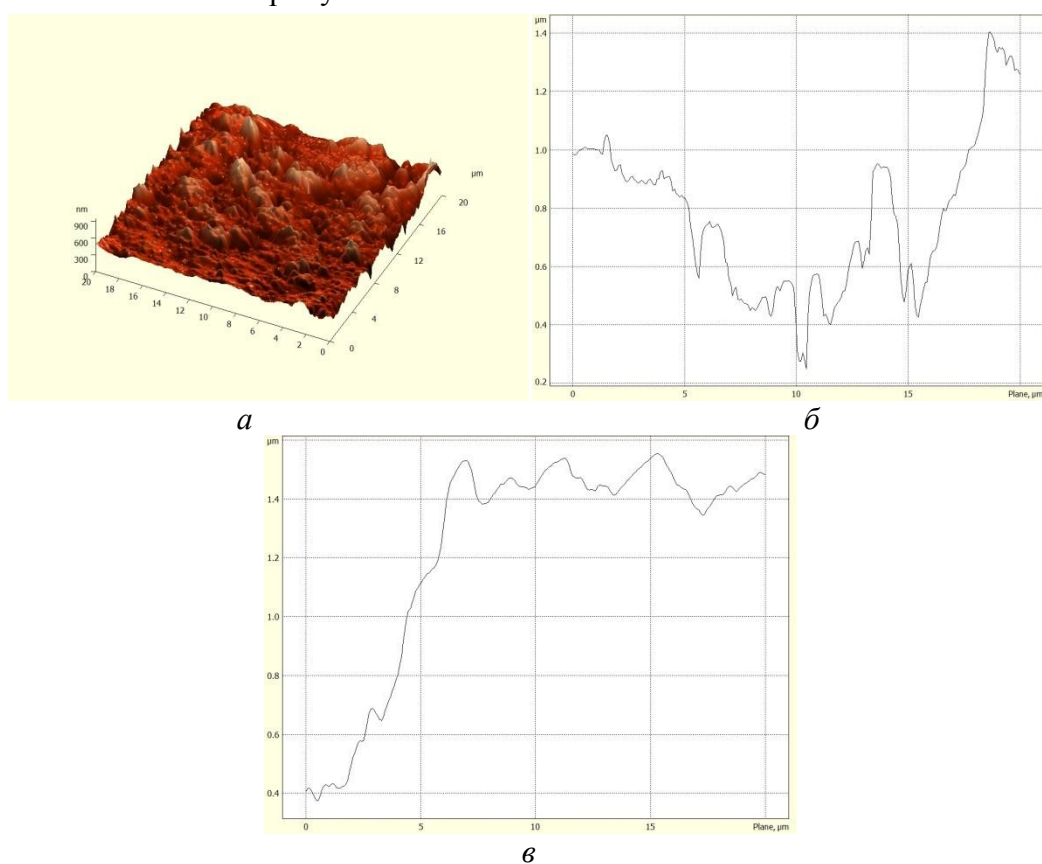


Рис. 5. Модель поверхности (а) и его профили по осям x (б) и y (в) образца без добавления УДПА

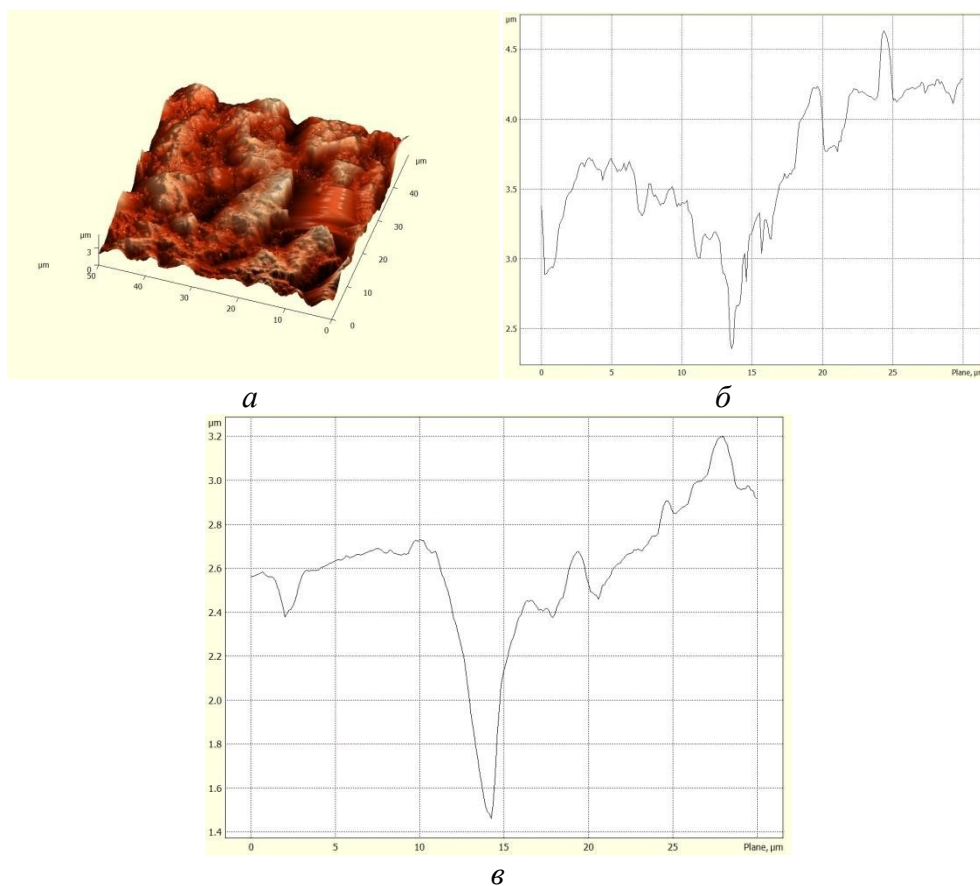


Рис. 6. Модель поверхности (а) и его профили по осям  $x$  (б) и  $y$  (в) образца без добавления УДПА

Для оценки шероховатости поверхности определяли высотный критерий  $R_z$ .

Высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$  представляет собой сумму средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины  $l$ , т. е.

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pmi} + \sum_{i=1}^5 |y_{vmi}|}{10} \quad (2)$$

где,  $y_{pmi}$  – высота выступа профиля, расстояние от средней линии профиля до высшей точки выступа профиля;  $y_{vmi}$  – глубина впадины профиля, расстояние от средней линии профиля до низшей точки впадины профиля.

Результаты исследований представлены ниже (табл. 3 и 4).

Таблица 3. Образец без УДПА

x			$R_z$ , МКМ	y			$R_z$ , МКМ
№	$y_{pmi}$	$y_{vmi}$		№	$y_{pmi}$	$y_{vmi}$	
1	0,25	0,25	0,253	1	0,6	0,51	0,546
2	0,15	0,35		2	0,5	0,39	
3	0,1	0,55		3	1,51	0,39	
4	0,09	0,35		4	0,5	0,41	
5	0,05	0,39		5	0,45	0,2	
$\Sigma$	0,64	1,89	$\Sigma$	3,56	1,9		

Таблица 4. Образец с УДПА

x			$R_z$ , мкм	y			$R_z$ , мкм
№	$y_{pmi}$	$y_{vmi}$		№	$y_{pmi}$	$y_{vmi}$	
1	0,25	0,6		1	0,11	1,1	
2	0,75	0,1		2	0,35	1,1	
3	1,2	0,5		3	0,25	0,1	
4	1,2	1,2		4	0,5	0,6	
5	0,7	0,4		5	0,8	0,6	
$\Sigma$	4,1	2,8	0,69	$\Sigma$	2,01	3,5	0,551

На основании расчетов можно утверждать то, что образцы с добавкой УД ППА имеют большую шероховатость, что для абразивного инструмента имеет большое значение, чем больше показатель шероховатости, тем больше материал сопротивляется износу. Если рассматривать однородный материал, должно быть так: чем материал плотнее и тверже – поверхность трения менее шероховатая. Если же композиционный материал, то ситуация несколько иная: связка более плотная и плотнее охватывает абразивное зерно, тогда связка выкрашивается вместе с зерном – поверхность трения более шероховатая. В нашем случае именно так можно объяснить большую шероховатость поверхности трения материала с УДППА.

Образцы также были исследованы методом рамановской спектроскопии с целью изучения распределения зерен шлифпорошка и УДППА по поверхности. Известно, что частицы алмаза имеют спектр отличный от спектра металла, т.е. в результате исследований должны быть отчетливо видны зерна алмаза.

Резкое изменение спектра на спектрограмме показывает нахождение лучом спектрографа частицы алмаза на поверхности (рис. 7).

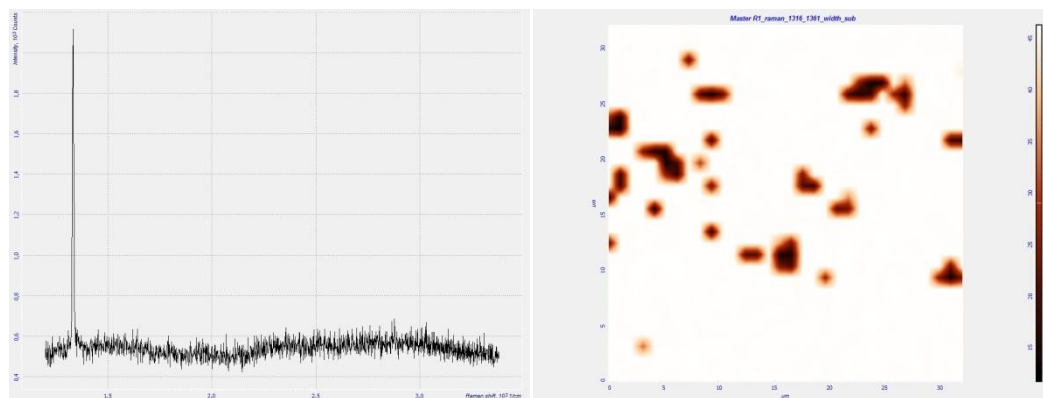


Рис.7 Спектрограмма и снимок поверхности образца с добавкой УДПА

### Выводы

Использование мелкодисперсных алмазных частиц в небольшом количестве в виде добавок в образцы металлической матрицы положительно влияет на качество получаемых композиционных материалов. В результате повышается их плотность и твердость, уменьшается пористость материала, повышается износостойкость, что позволяет прогнозировать улучшение эксплуатационных показателей работы алмазного инструмента.

*Досліджено вплив добавок алмазних мікро- і нанопорошків на фізико-механічні властивості порошкового сплаву. Показано позитивний вплив використання алмазних*

часток в якості наповнювачів у металевій матриці на властивості і структуру композиційних матеріалів.

**Ключові слова:** порошки природних алмазів, ультрадисперсні порошки, олов'яниста бронза, пористість, зносостійкість, шорсткість

*The influence of diamond micro-and nanopowders additives to the physical and mechanical properties of the powder alloy was investigated. A positive effect of usage of diamond particles as filler in a metal matrix to structure and properties of composite materials is demonstrated.*

**Key words:** natural diamond powder, ultrafine powder, straight bronze, porosity, wear resisting property, gritness.

### Литература

1. Новиков Н. В., Богатырева Г. П. Наноалмазы статического и детонационного синтеза и перспектива их применения // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 2. – С. 3–12.
2. Долматов В. Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза. Получение, свойства, применение. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 344 с.

Поступила 05.06.13

УДК 621.762

**В. Н. Шуменко**, канд. техн. наук

ФГОУ ВПО «Национальный исследовательский автономный технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

### ТВЁРДОФАЗНОЕ СПЕКАНИЕ ТВЁРДОГО СПЛАВА TiC–Ni

*Изучено твёрдофазное спекание. Установлено, что поведение частиц на поверхности отличается от поведения частиц внутри образца, т.к. они имеют разную степень свободы. Установлено, что в образце при твёрдофазном спекании, в зависимости от размеров частиц Ni, происходят два процесса: образование каркаса частиц TiC и вязкое течение никелевой фазы, которое, в результате изменения формы частиц Ni, приводит к росту между частичных пор. Третий процесс – образование центров плавления.*

**Ключевые слова:** твёрдофазное спекание, твёрдый сплав TiC–Ni.

Взаимодействие частиц в твёрдой фазе предшествует жидкофазному спеканию. Поэтому важно знать, что происходит с частицами перед их контактном плавлении.

#### **Характеристика исходных материалов и методика эксперимента**

Твёрдофазное спекание было изучено на системе: 80 масс. % TiC – 20 масс. % Ni.

Эксперименты проводили на сканирующем электронном микроскопе японской фирмы JEOL, марки JSM-U5 с блоком нагрева [1, 2] в Калифорнийском университете, г. Беркли.

В работе использовали:

- карбид титана фирмы Union Carbide, с размером частиц 3–7 мкм и следующим химическим составом (масс. %): C<sub>общ</sub> – 19,25; C<sub>св</sub> – 0,10; др. элементы – 0,02.