

УДК 621.793.7

**ПОВЫШЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ДЕТАЛЕЙ МАШИН ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ  
ДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ СМЕСЬЮ ПОРОШКОВ БрАЖ9-4 и  $Al_2O_3$** **Петрова Елена Евгеньевна,**старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, e-mail: petrova.lena-  
petrova2010@yandex.ru**Пимонов Максим Владимирович,**старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, e-mail:  
maks130685@rambler.ru**Князьков Виктор Леонидович,**

канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, e-mail: vntk50@mail.ru

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.**Аннотация**

Антифрикционные сплавы, применяемые для изготовления деталей машин горнодобывающего оборудования, имеют недостаточно высокую твердость, поэтому в процессе эксплуатации зачастую деформируются и подвергаются ускоренному износу. Целью работы является, повышение твердости, антифрикционных свойств и износостойкости поверхностей деталей машин горнодобывающего оборудования, таких как втулки гидроцилиндров, соединений стрел и ковшей, зубчатые венцы и др., изготавливаемых, как правило из сплавов на основе меди. В работе исследовано влияние модифицирования поверхности образцов выполненное в процессе детонационного напыления смеси порошков ПР-БрАЖ9-4-3 и  $Al_2O_3$ . Процентное содержание порошков в напыляемой смеси изменяли в соотношении 1:9÷5:5. Для обеспечения требуемых значений микротвердости, процентное соотношение смеси порошков ПР-БрАЖ9-4-3 и  $Al_2O_3$ , должно составлять 4:6. При другом соотношении, было обнаружено значительный разброс значений микротвердости. Проведены исследования топографии напыленной смесью порошков поверхности на сканирующем туннельном микроскопе. Обнаружены частицы округлой формы, размеры которых составляют около 1,25x0,5x500 нм, данный фактор свидетельствует о присутствии нерасплавленных частиц при напылении частиц  $Al_2O_3$ . В процессе металлографического исследования было установлено наличие в нанесенном слое модифицированного сплава двух фаз:  $\alpha$ -фазы и  $\alpha+\gamma$ . Неравномерное распределение микротвердости на напыленной поверхности свидетельствует о некоторых недостатках разработанной технологии модифицирования, таких как сложность получение смеси равномерного состава, обладающей высокими технологическими свойствами, а также необходимости корректировки режимов напыления.

**Ключевые слова:** Детонационное напыление, ультрамелкодисперсные частицы керамики, электронная микроскопия, спектральный анализ, микротвердость, топография поверхности, микроскопические исследования.

Поверхности втулок гидроцилиндров, опорных втулок стрел экскаваторов ЭКГ-5 и ГШ и т.д., изготавливаемых методом литья и последующей механической обработкой имеют недостаточную твердость и, зачастую, в результате воздействия высоких нагрузок - деформируются.

Представленные в работе [1] способы повышения твердости и антифрикционных свойств способом плазменно-порошковой наплавки слоя, модифицированного ультрамелкодисперсными частицами  $Al_2O_3$ , наряду с высокими свойствами покрытия имеют ряд недостатков, таких как, разложение в процессе наплавки некоторой части частиц  $Al_2O_3$ , высокое качество покрытий достижимо в узком интервале

режимов, наличие основного металла в наплавленном, снижает антифрикционные свойства таких покрытий [2]. Применение детонационного напыления взамен плазменного, вследствие значительного различия технологических особенностей, а именно: отсутствие перемешивания основного и напыляемого металлов, малое, относительно плазменно-порошкового способа время контакта веществ в нагретом состоянии, значительно снижает склонность ультрамелкодисперсных частиц  $Al_2O_3$  к разложению. При детонационном нанесении покрытий, вследствие циклического характера процесса, температура нагрева детали, как правило, ниже уровня структурных изменений, прочность сцепления напыленного

слоя может достигать 200-240 МПа [3 – 5]. Гипотеза заключается в том, что высокие антифрикционные свойства и твердость частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в сочетании с основой из антифрикционного сплава БрАЖ9-4 могут сформировать, в результате напыления, покрытие с новыми свойствами.

Применение ультрамелкодисперсных частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обусловлено двумя факторами: первый – необходимостью снижения отрицательного влияния твердых частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на антифрикционные свойства покрытия [6]; второй – предотвращение перегрева и, соответственно, разложения частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при соударении с основой. Влияние массы частиц на температуру, которая повышается в результате превращения кинетической энергии в тепловую при соударении с основой, представлено в работе [7]

$$\frac{pv^2}{2g473} = p\{c(T_{пл} - 70) + s\}$$

где *p* – масса частицы, г; *v* – скорость полета частицы, м/с; *g* – ускорение силы тяжести (980 см/с<sup>2</sup>); *c* – удельная теплоемкость напыляемого материала, кал/г °С; *T<sub>пл</sub>* – температура плавления напыляемого материала °С; *s* – скрытая теплота плавления напыляемого материала, кал/г.

Детонационное напыление выполняли на автоматической установке «Обь» при следующих параметрах: давление воздуха 0,2 – 0,18 МПа, расход воздуха *G* < 0,01 кг/с; давление кислорода 0,14 МПа, расход – < 0,002 кг/с; давление ацетилен 0,135 МПа, расход – < 0,001 кг/с; давление пропан-бутана 0,135 МПа, расход – < 0,001 кг/с.

Основные характеристики

ультрамелкодисперсных частиц керамики Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, представлены в табл. 1. При напылении на поверхность образца из стали 20, использовали смесь порошков Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ПР-БрАЖ9-4-3 (фракция 20 – 40 мкм). Свойства порошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> представлены в технических условиях [7].

Таблица 1. – Основные характеристики порошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Наименование показателя	Норма для марок
	Марка А
Внешний вид	Высокодисперсный порошок белого цвета
Структура кристалла	Бемит
Размер кристаллитов, Å, не более	1 000
Удельная специфическая поверхность, м <sup>2</sup> /г, в пределах	10 ÷ 400

Состояние керамического порошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> перед применением исследовалось в лаборатории физики ГОУ ВПО Томского архитектурно-строительного университета методом просвечивающей электронной микроскопии с помощью угольных реплик. Просмотр угольных реплик, на которые осаждались исследуемые порошки, осуществлялся на электронном микроскопе ЭМ-125 при ускоряющем напряжении 125 кВ и рабочих увеличениях в колонне микроскопа от 25 000 до 80 000 крат.

Характеристики керамического порошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> более подробно описаны в [8].

В табл.2 представлены результаты

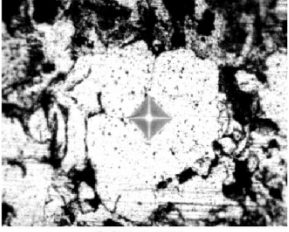
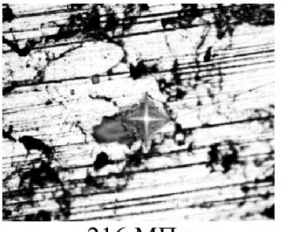
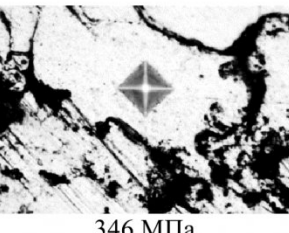
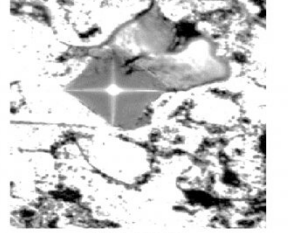

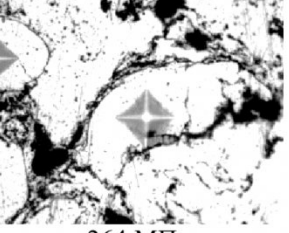
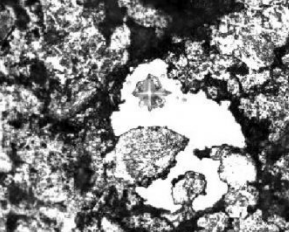

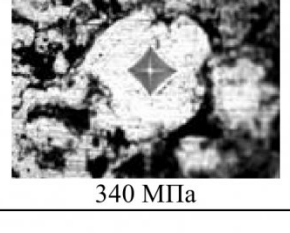
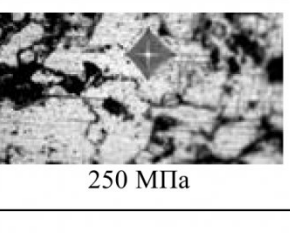
Таблица 2. – Химический состав напыленного слоя Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ПР-БрАЖ9-4-3

Напыляемые материалы	Доля химических элементов (%)			
	Fe	Al	Cu	Примеси
1:9	3,072	6,244	88,98	1,704
2:8	3,014	7,308	88,36	1,318
3:7	3,276	8,535	86,75	1,439
4:6	3,131	7,917	87,36	1,592
5:5	3,458	8,872	86,20	1,470

Таблица 3. – Микротвердость поверхности напыленного образца, HV, МПа

Содержание компонентов	Расстояние между точками, мм									Среднее значение	Среднее отклонение
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5		
1:9	234	218	222	216	230	297	245	239	227	236,4	24,6
2:8	316	196	278	346	329	335	240	214	321	286,1	56,4
3:7	267	301	264	304	337	270	289	301	350	298,1	30,1
4:6	303	345	300	308	320	416	295	301	290	319,8	39,6
5:5	320	300	275	250	270	271	260	340	325	290,1	32,0

Таблица 4. – Характер структуры напыленного детонационным методом слоя

Содержание $Al_2O_3$ и ПР-БрАЖ9-4-3	Max	Min
1:9	 297 МПа	 216 МПа
2:8	 346 МПа	 196 МПа
3:7	 337 МПа	 264 МПа
4:6	 416 МПа	 290 МПа
5:5	 340 МПа	 250 МПа

спектрального анализа напыленных слоев с различным процентным соотношением  $Al_2O_3$ .

Показано, что в процессе напыления в атмосфере смеси ацетилена ( $C_2H_2$ ) и пропан  $C_3H_8$  - бутана  $C_4H_{10}$ , происходит неравномерное распределение элементов Fe, Al, Cu.

Исследование микротвердости проводили в лаборатории КузГТУ на кафедре технологии машиностроения. Измерения выполняли в 9-и точках (в каждой, не менее 4-х измерений) прибором Dura Scan по ГОСТ 9450-76 вдавливанием наконечника (четырёхугольной пирамидой с квадратным основанием) под нагрузкой 0,1 кг приложенной в течение 15 с при

увеличении 10 крат, результаты измерений микротвердости и характер микроструктуры представлены в таблицах 3 и 4. В процессе измерений не было выявлено значительного увеличения микротвердости [8], в связи с этим были проведены дополнительные исследования.

Результаты измерений обработаны методами математической статистики.

Видно (рис. 1), что наибольший разброс значений микротвердости соответствует отношению 2:8, более высокие и стабильные значения микротвердости с незначительным разбросом, получены при детонационном напылении порошков в соотношении 4:6.

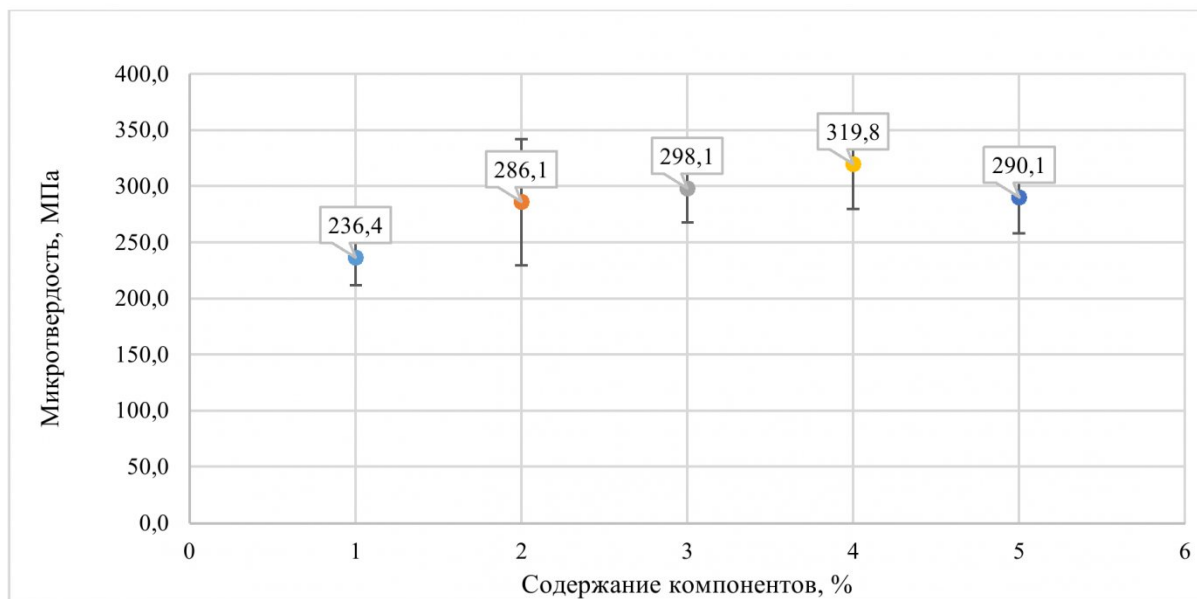


Рис. 1. Влияние процентного содержания  $Al_2O_3$  на микротвердость ( $Al_2O_3$  и ПР-БрАЖ9-4-3): 1 – 1:9; 2 – 2:8; 3 – 3:7; 4 – 4:6; 5 – 5:5

Следует отметить, что полученные результаты значений микротвердости, которые представлены в табл. 3, характеризуются высоким разбросом и зависят от структуры поверхности. Однако микротвердость модифицированного слоя выше,

чем немодифицированного, что свидетельствует об эффекте упрочнения.

Топографию напыленной поверхности исследовали в лаборатории КузГТУ на сканирующем туннельном микроскопе, на

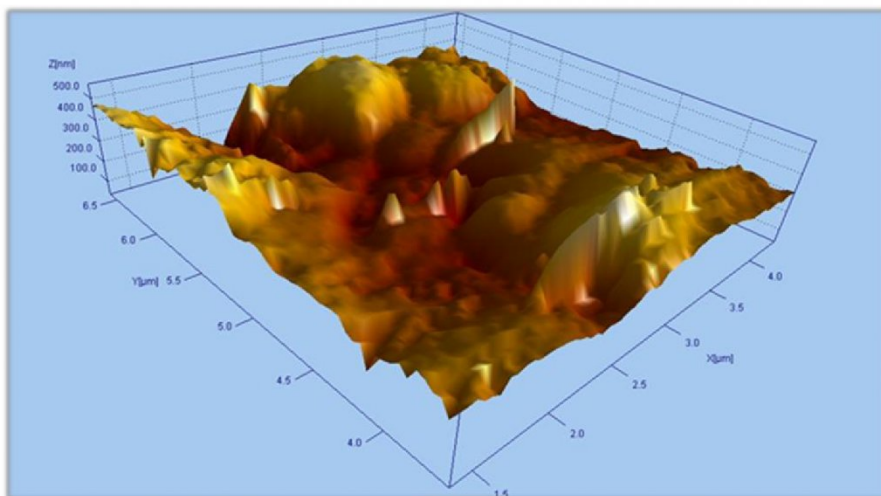


Рис. 2. Осколок напыленной поверхности в сканирующем туннельном микроскопе НТК «УМКА» (разрешение  $10^{-8}$ )

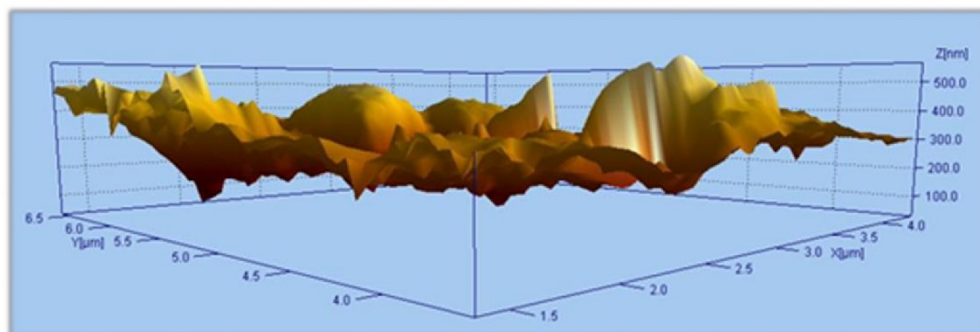


Рис.3. Размер осколка в сканирующем туннельном микроскопе по оси Z (разрешение  $10^{-8}$ )

напыленной поверхности с содержанием 10%  $Al_2O_3$ . Исследование выполняли на наноуровне, необходимо отметить, что данное исследование выполняли на не шлифованном осколке напыленной поверхности.

Установлено (рис. 2), что выступы на поверхности имеют овальную форму и составляют 500 нм. Как можно предположить, что отдельные выступы, являются нерасплавленными частицами порошка или зернами. Размер которых составляет 1,25x0,5x500 нм (рис. 3).

Микроскопические исследования напыленных образцов выполняли на микроскопе МИМ-8, при увеличении  $\times 100$ ,  $\times 500$ . Травление образцов выполняли 5% раствором  $FeCl_3$  в 10% растворе  $HCl$  погружением на 5-10 секунд.

При травлении структура образца имеет цветную (медную) и черную окраску различной тональности.

В структуре образцов были обнаружены  $\alpha$ -

фаза (светлые зерна – твердый раствор алюминия в меди) и эвтектид ( $\alpha + \gamma$ ) (темные вытравливающиеся зерна). Внутри зерен обнаружены мелкие включения железо-содержащей фазы (рисунок 4) [9].

За счет теплообмена возникшего в результате детонации горючей смеси, температура напыляемых частиц может достигать 4000 °C [10], в следствии чего фаза  $\beta$  распалась с образованием эвтектида:  $\beta \rightarrow \alpha + \gamma$ . Фаза  $\gamma$  представляет собой твердый раствор на основе электронного соединения  $Cu_{32}Al_{19}$  [9].

В структуре обнаружили флокуляцию частиц  $Al_2O_3$ , произошедшую во время напыления (рис. 4 а, б).

На всех исследованных образцах граница раздела между фазами практически отсутствует. По выявленным границам  $\alpha$  – фазы располагается фаза  $\alpha + \gamma$  (рис.4, в).

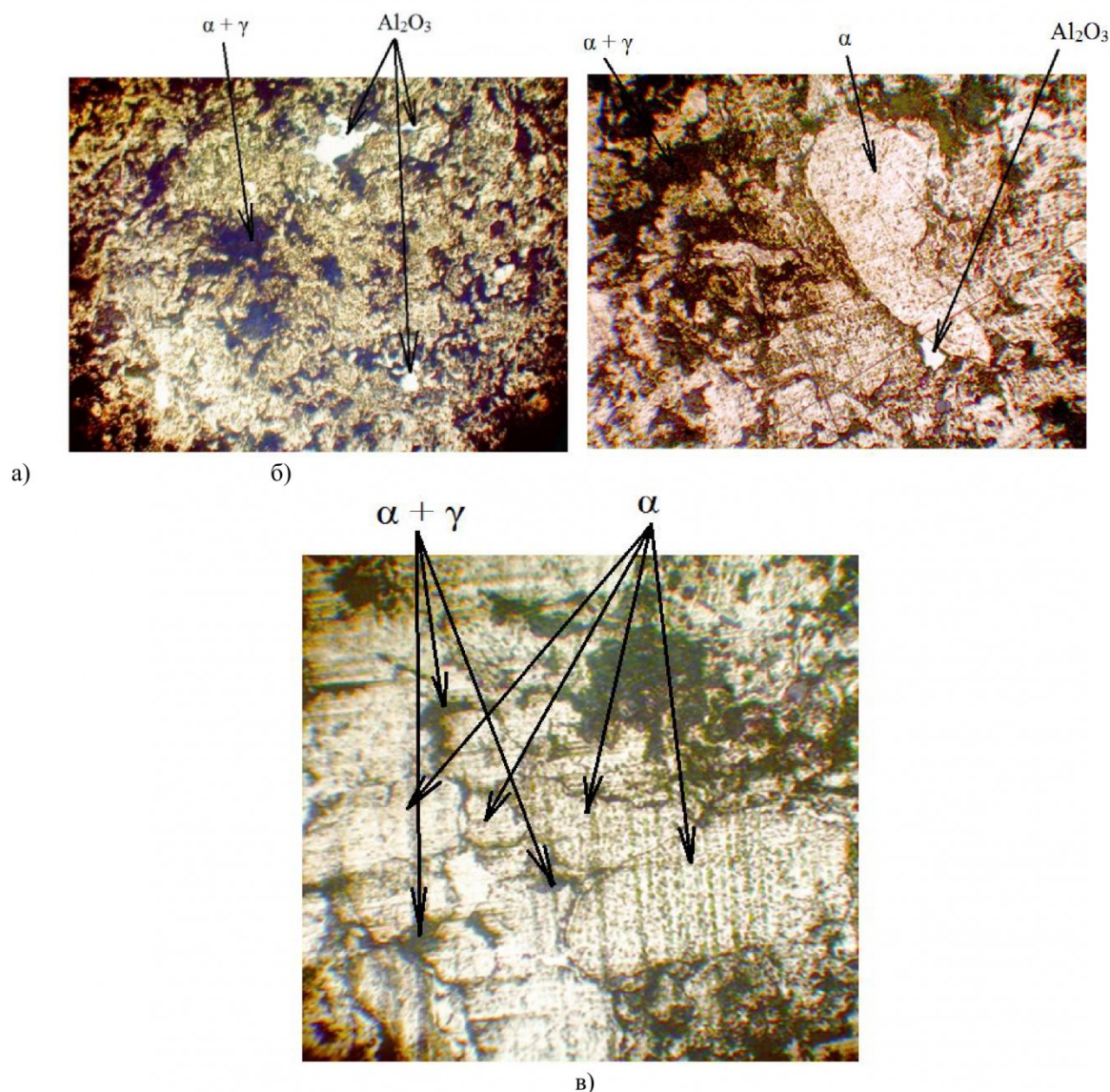


Рис. 4. Микроструктура напыленного образца с содержанием 40%  $Al_2O_3$  (а, б – при увеличении  $\times 500$ ; в – при увеличении  $\times 100$ )

**Выводы**

1. Применение детонационного напыления с содержанием 40 %  $Al_2O_3$  привело к повышению микротвердости напыленного слоя, что подтверждает гипотезу о возможности повышения износостойкости путем использования  $Al_2O_3$ .

2. При металлографическом исследовании было установлено наличие в нанесенном слое модифицированного сплава двух фаз:  $\alpha$ -фазы и  $\alpha+\gamma$ . И наличие флокуляции частиц  $Al_2O_3$ , с

образованием коагуляционных структур.

3. Для повышения твердости, износостойкости и антифрикционных свойств модифицированного слоя необходимо проведение дополнительных исследований.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ, соглашение номер 14-19-00724.*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Плазменно-порошковая наплавка слоя бронзы, модифицированного наноразмерными частицами  $Al_2O_3$ . Сборник докладов 13-й международной научно-практической конференции «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано до макроуровня» / Князьков В.Л., Смирнов А.Н., Козлов Э.В., Радченко М.В., Князьков К.В., Мазалов Ю.А. - Санкт-Петербург, 2011. Ч. 1. С. 157-163.
2. Нанотехнологии в машиностроении / Смирнов А. Н., Князьков В. Л., Абабков Н. В., Князьков К. В., Пимонов М. В.. – Кемерово: ООО «Сибирская издательская группа», 2014. – 207 с.
3. *Бартенев, С. С.* Детонационные покрытия в машиностроении - Ленинград: Машиностроение. - 1982. - 215 с.
4. *Папырин, А. Н.* Новые материалы и технологии. Теория и практика упрочнения материалов в экстремальных процессах; Российская академия наук, Институт теплофизики; - Новосибирск: Наука. - 1992. – С. 131-132.
5. *Кулик, А. Я.* Газотермическое напыление композиционных порошков. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение. - 1985. - 199 с.
6. *Мартин, Д. В.* Краткая энциклопедия по структуре материалов. – Москва: Техносфера, 2011. – С41 – 54.
7. ТУ 2133-001-76634032-2006. Алюминия оксигидроокись (бемит). – М.:АЛЮМ-Э, 2006. 18 с
8. *Смирнов, А. Н.* Экспертиза промышленной безопасности в Сибирском регионе. – М.: Машиностроение, 2015. – С. 192-198.
9. *Мальцев, М. В.* Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. – Москва, 1970. – С.163-171, С.344.
10. Восстановление деталей машин: Справочник / Пантелеенко Ф. И., Лялякин В. П., Иванов В. П., Константинов В. М. – М.: Машиностроение, 2003. – С. 366-367.

*Поступило в редакцию 13.05.2015*

**IMPROVEMENT OF PROPERTIES ANTIFRICTIONAL OF THE SURFACE  
MACHINE PARTS OF THE MINING EQUIPMENT BY DETONATION  
SPUTTERING A MIXTURE OF POWDERS OF  $BrA\bar{H}9-4$  AND  $Al_2O_3$**

**Petrova Elena E.,**

senior lecturer, e-mail: petrova.lena-petrova2010@yandex.ru

**Pimonov Maxim V.,**

senior lecturer, e-mail: makc130685@rambler.ru

**Knjazkov Viktor L.,**

Candidate Sc. in Engineering, Associate Professor, e-mail: vntk50@mail.ru

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya st., Kemerovo, 650000, Russia.

**Abstract**

*Antifriction alloys used for manufacturing machine parts of mining equipment have modest hardness they are frequently so are in the frequently deformation and are subject to accelerated wear. The research is aimed at the increasing hardness wear resistance and properties antifriction during the operation process of the surface machine parts of mining equipment, such as hydraulic cylinder bushings, joints boom bucket joints and gearings, etc., usually produced of copper-based alloys. The research showed impact samples surface modification made*

during the process of detonation sputtering this mixture of powders of PR-BrAТ9-4-3 and  $Al_2O_3$ . The percentage of powders in the sputtering mixture changed whose the ratio of 1: 9 ÷ 5: 5. To ensure the required values of microhardness the percentage of mixture powders PR-BrAТ9-4-3 and  $Al_2O_3$ , must be 4: 6. When another ratio found significant variations of microhardness were found. Studies on the topography of the surface of the powder mixture were carried out with a scanning tunneling microscope. Rounded particles are detected whose size of which is about 1,25x0, 5x500 NM, this factor indicates the presence of unfused particles in sputtering  $Al_2O_3$  particle. Metallographic study found that presence of modified alloy of two phases in the sputtered layer:  $\alpha$ -phase and  $\alpha + \gamma$ . The uneven distribution of microhardness on surface sputtered reveals certain drawbacks of the modification technology developed, such as difficulty of obtaining a uniform mixture composition with high technological characteristics, as well as the need to adjust the sputtering modes.

**Key words:** Detonation sputtering, ultrafinely divided particles of ceramics, electron microscopy, spectral analysis, microhardness, surface topography, the microscopic studies.

## REFERENCES

- [1] Плазменно-порошковая наплавка слоя бронзы, модифицированного наноразмерными частицами  $Al_2O_3$ . Сборник докладов 13-й международной научно-практической конференции «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от nano до макроразмера» / В.Л. Князьков, А.Н. Smirnov, JE.V. Kozlov, M.V. Radchenko, K.V. Knyaz'kov, JU.A. Mazalov - Sankt-Peterburg, 2011. CH. 1. S. 157-163.
- [2] Nanotehnologii v mashinostroenii/ A. N. Smirnov, V. L. Knyaz'kov, N. V. Ababkov, K. V. Knyaz'kov, M. V. Pimonov. – Kemerovo: ООО «Sibirskaja izdatel'skaja grupa», 2014. – 207 s.
- [3] Bartenev, S. S. Detonacionnye pokrytija v mashinostroenii - Leningrad: Mashinostroenie. - 1982. - 215 s.
- [4] Papyrin, A. N. Novye materialy i tehnologii. Teorija i praktika uprochnenija materialov v jekstremal'nyh processah; Rossijskaja akademija nauk, Institut teplofiziki; - Novosibirsk: Nauka. - 1992. – С. 131-132.
- [5] Kulik, A. JA. Gazotermicheskoe napylenie kompozicionnyh poroshkov. – L.: Mashinostroenie. Leningradskoe otdelenie. - 1985. - 199 s.
- [6] Martin, D. V. Kratkaja jenciklopedija po strukture materialov. – Moskva: Tehnosfera, 2011. – S41 – 54.
- [7] TU 2133-001-76634032-2006. Aljuminija oksigidrookis' (bemit). – M.:ALJUM-JE, 2006. – 18 s.
- [8] Smirnov, A. N. JEkspertiza promyshlennoj bezopasnosti v Sibirskom regione. – M.: Mashinostroenie, 2015. – S. 192-198.
- [9] Mal'cev, M. V. Metallografija promyshlennyh cvetnyh metallov i splavov. – Moskva, 1970. – S.163-171, S.344.
- [10] Vosstanovlenie detalej mashin: Spravochnik / F. I. Panteleenko, V. P. Ljaljakin, V. P. Ivanov, V. M. Konstantinov – M.: Mashinostroenie, 2003. – S. 366-367.

Received 13.05.2015