

Довгаль А.Г.

Национальный авиационный университет,
г. Киев, Украина
E-mail: 270579@ukr.net

**СТРУКТУРА И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ДЕТОНАЦИОННЫХ
ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ
СИСТЕМЫ SiC-Al₂O₃ В ПАРЕ
СО СТАЛЬНЫМ КОНТРТЕЛОМ
БЕЗ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

УДК 629.045 (045)

Исследована структура покрытий из композиционного материала, содержащего износостойкую составляющую SiC-Al₂O₃ и металлическую связку на основе железа полученную в результате размола композиции в стальных барабанах, полученных детонационным методом на среднеуглеродистых сталях. Изучены триботехнические характеристики полученных покрытий в условиях трения без смазочных материалов на воздухе, определены особенности и закономерности механизмов их изнашивания.

Ключевые слова: покрытие, керамика, смачивание, намол, детонационное напыление, износостойкость.

Введение

Проблема повышения износо- и коррозионной стойкости деталей машин является актуальной в условиях эксплуатации оборудования при высоких скоростях и нагрузках. Перспективными для таких условий работы являются керамические материалы, которые обладают высокой стойкостью в условиях интенсивного изнашивания и к воздействию агрессивных сред. Этим требованиям удовлетворяют керамические композиты на основе карбида кремния и оксида алюминия, которые обладают высоким уровнем физико-механических свойств, а также являются недорогими и недефицитными материалами.

Анализ последних исследований и публикаций

Карбидокремниевые композиционные материалы могут применяться, как в виде компактных изделий [1], так и в качестве покрытий на поверхности деталей, работающих в узлах трибосопряжений. Преимущество применения керамических материалов в качестве покрытий заключается в локальном их использовании на трущихся поверхностях, что приводит к существенной экономии этих материалов. Для нанесения газотермическими методами керамических порошковых композиционных материалов на стальные поверхности необходимо введение в шихту металлической составляющей, которая обеспечивала бы адгезионное сцепление керамики со стальной подложкой и когезионное сцепление между фазами покрытия. Введение металлической связки в керамическую композицию также существенно снижает энергозатраты и упрощает поиск оптимальных режимов нанесения покрытий.

Износостойкой составляющей композита для нанесения детонационных покрытий выбрана керамика SiC-Al₂O₃, испытанная ранее в качестве компактного керамического материала и обладающая высоким уровнем триботехнических характеристик, как в паре со стальным [1], так и в паре с керамическим [2] контртелами. Введение металлической связки традиционным образом представляет определенные технологические трудности, которые заключаются в низкой стойкости карбида кремния в металлических расплавах и интенсивном его взаимодействии с образованием силицидов. Так, было установлено, что упрочняющая карбидокремниевая фаза сохраняется без химических превращений при обеспечении удовлетворительного смачивания только в интерметаллидах [3], так как присутствие других элементов в металлической связке пассивирует химическую активность расплава. В результате этого исследования было разработано износостойкое покрытие на основе SiC-Al₂O₃ со связкой на основе Ni-Al, которое было нанесено газотермическими методами и показало высокий уровень триботехнических свойств [4]. Принимая во внимание упомянутые выше особенности структурообразования карбидокремниевых композитов с металлической связкой был предложен новаторский подход в плане введения металлической связки в композицию SiC-Al₂O₃, а именно, получение металлических добавок в процессе размола и перемешивания этой композиции в стальных барабанах и стальными размольными телами, что позволило ввести в композит железо, которое не смачивает эту систему, но за счет масштабного фактора (размера частиц) и снижения температуры синтеза удалось получить керамику, которая показала высокий уровень триботехнических свойств как в паре со стальным [5], так и в паре с керамическим контртелом [6]. Поэтому большой научный интерес представляет применение этой композиции в качестве износостойких покрытий на среднеуглеродистых сталях [7 - 9]. В качестве метода нанесения покрытий был избран детонационный метод напыления, который позволяет получать высокоплотные покрытия, и характеризуется низким температурным воздействием на деталь и порошковую композицию.

Цели исследования

Получение износостойких покрытий из системы (SiC-Al₂O₃)-Fe детонационным методом напыления, испытание этих покрытий на износостойкость без смазочных материалов и определение механизмов их изнашивания.

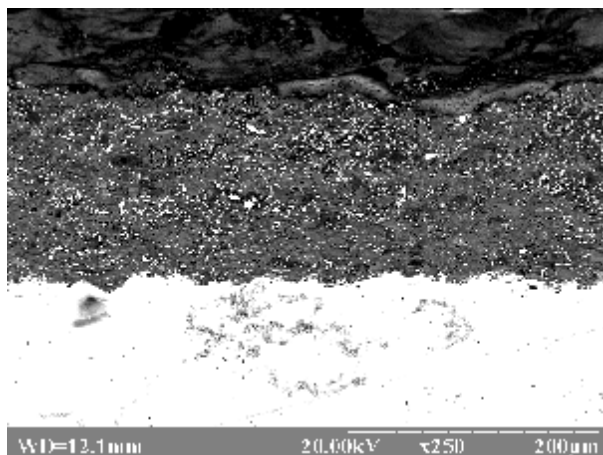
Материалы и методика проведения испытаний

Предварительно порошки оксида алюминия (ТУ 6-09-2486-77) средний размер которых составлял 40-45 мкм и карбида кремния средним размером 45-50 мкм марки 64С (ГОСТ 26 327 - 84) концентрации 50 % SiC – 50 % Al₂O₃ перемешивали в стальных барабанах со стальными размольными телами в планетарной мельнице «Санд-1» в среде ацетона в стальных барабанах на протяжении 32 часов. Полученную шихту сушили и просеивали через сито. Методами химического анализа определяли количество намола железа, которое составило 19,3 % масс. Полученную шихту прессовали при температуре 1540 °С для конгломерирования компонентов керамики с металлической связкой, затем шихту размалывали и просеивали до размера частиц менее 63 мкм.

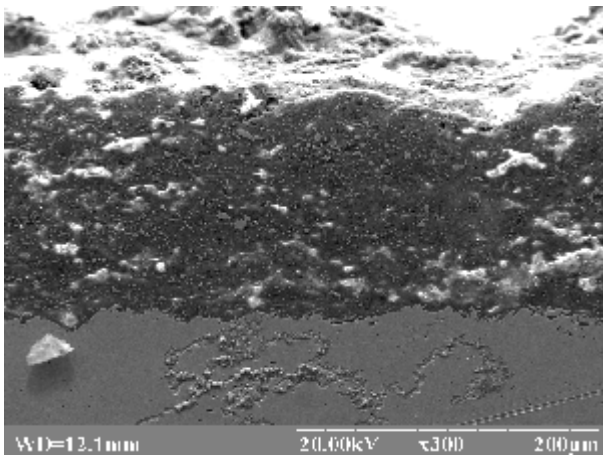
Покрытия наносили на детонационной установке: «Днепр-3М», на которой определяли оптимальные режимы нанесения детонационных покрытий по толщине и сплошности покрытия. Для полученной композиции были определены следующие режимы. Рабочий газ – смесь C₂H₂-O₂. Расход C₂H₂ – 30 дел, O₂ – 70 дел. Подача порошка – 30 дел. Продувка ствола после окончания цикла – воздух. Транспортирующий газ – воздух. Скорострельность – 4 выстрела в секунду. Диаметр пятна – 22 мм. Дистанция напыления 170 мм. Покрытие наносилось на пластину для анализа адгезии, остаточных напряжений и металлографических исследований – толщина 175 мкм, время нанесения 10 секунд. Нанесение на пальцы для машины трения «плоскость - плоскость» - толщина 300 мкм – время нанесения 20 секунд.

Структуру детонационных покрытий из композиционного материала (SiC – Al₂O₃)- Fe исследовали методом электронной микроскопии на растровом электронном микроскопе РЭМ-106И и на дифракционном рентгенофазовом анализаторе ДРОН-3.0.

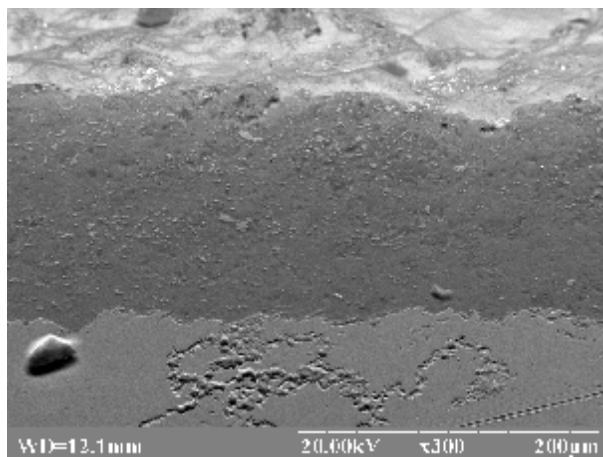
Композиционное детонационное покрытие из системы (SiC-Al₂O₃)-Fe, испытывали на машине трения по схеме плоскость - плоскость в паре со стальным контртелом, без смазочных материалов (по методике описанной в [2]) в диапазоне скоростей скольжения 2 - 7 м/с и нагрузок 2 - 6 МПа. Поверхности трения образцов с



а



б



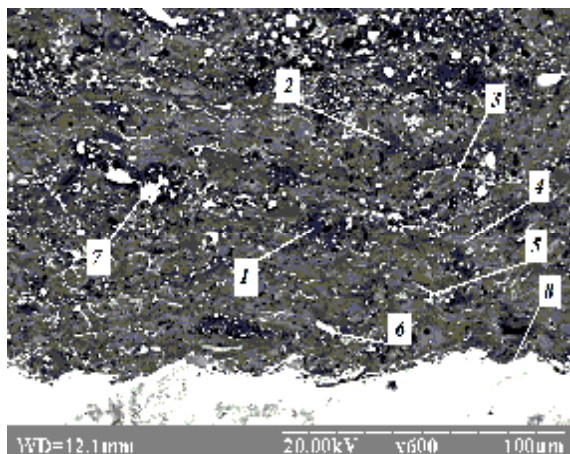
в

Рис. 1 – Электронные фотографии детонационного покрытия системы (SiC-Al₂O₃)-Fe, ув. 300:
а – в отраженных электронах;
б – во вторичных электронах;
в – топография поверхности

покрытием исследованы на растровом электронном микроскопе РЭМ-106И.

Результаты исследования

Общая морфология покрытия представлена на рис. 1, в трех снимках: в отраженных (рис. 1, а); во вторичных (рис. 1, б) и топографическом исследовании поверхности (рис. 1, в). Из первого снимка можно сделать вывод, что покрытие представляет собой гетерофазный слой толщиной 150 мкм, состоящий из трех фаз и плотно прилегающий к стальной подложке. Адгезия этого покрытия составляет 7 МПа. Во вторичных электронах (рис. 1, б) на снимке белым цветом выделяются фазы, которые имеют металлическую структуру (в покрытии около 15 - 20 %), так как они обладают большей проводимостью и являются самым интенсивным источником вторичных электронов. Топографическое исследование поверхности среза покрытия дает представление и пористости покрытия которая составляет менее 1 %. Микроструктура покрытия (рис. 2) представляет собой композиционный материал, состоящий из матрицы на основе оксида алюминия, в которой равномерно распределены частицы SiC.



Спектр	C	O	Al	Si	Fe
Спектр 1	47,53	-	-	52,47	-
Спектр 2	41,11	-	-	57,89	-
Спектр 3	-	54,02	45,98	-	-
Спектр 4	-	53,03	46,97	-	-
Спектр 5	-	-	-	33,66	76,34
Спектр 6	-	-	-	19,23	80,77
Спектр 7	0,03	45,18	-	14,65	40,14
Спектр 8	0,04	-	-	-	98,99

Рис. 2 – Микроструктура полученных детонационных покрытий из системы (SiC-50%Al₂O₃) – Fe с указанием участков микрорентгеноспектрального анализа

Возможные поры в керамике заполнены фазами на основе железа состав которых, соответствует силицидам и силикатам железа (табл. к рис. 2). Это подтвердил и рентгенофазовый анализ, который обнаружил в покрытии фазы SiC, Al₂O₃, Fe_{1,34}Si_{0,66}, Fe₃Si, Fe₂SiO₄. Толщина покрытий изменяется в пределах 150 - 170 мкм. Размер керамических включений изменяется в пределах от 3 до 10 мкм.

Так как ранее была исследована износостойкость компактной керамики этого состава [5, 6] и композиционного покрытия на основе SiC-Al₂O₃ с металлической связкой на основе интерметаллида Ni₃Al [4], то и детонационные карбидокремниевые покрытия системы (SiC-Al₂O₃)-Fe были испытаны на износостойкость в условиях, которые описаны в этих работах для определения условий применимости полученных новых покрытий.

Триботехнические испытания проводились по двум схемам: при постоянной нагрузке 2 МПа, изучали влияние скорости трения и при постоянной скорости 7 м/с, исследовали влияние нагрузки на интенсивность изнашивания и коэффициенты трения соответственно.

Результаты триботехнических испытаний композиционных детонационных покрытий при постоянной нагрузке показали, что с увеличением скорости интенсивность изнашивания уменьшается с 33,3 мкм/км при скорости испытаний 2 м/с до 27,3 мкм/км при 7 м/с. Эти значения более чем в два раза превосходят результаты испытания стальных образцов (рис. 3). Коэффициенты трения при испытании покрытий в зависимости от скорости трения изменяются в пределах от 0,31 до 0,28. Испытания образцов с покрытиями при постоянной скорости 7 м/с показали (рис. 3), что с увеличением нагрузки интенсивность изнашивания незначительно увеличивается с 14,6 мкм/км при $P = 2$ МПа до 27,4 мкм/км при $P = 4$ МПа. При давлении 5 МПа покрытие отслаивается полностью со стальной поверхности, по видимому имеет место адгезионный отрыв. Интенсивность изнашивания стальных образцов с увеличением нагрузки резко возрастает с 41,6 мкм/км до 61 мкм/км. Таким образом, при наиболее жестких условиях испытания интенсивность изнашивания образцов с покрытиями в два раза меньше, чем этот показатель у образцов из закаленной стали 45 (рис. 3). Интенсивность изнашивания контртела при испытаниях не превышала 10 мкм/км.

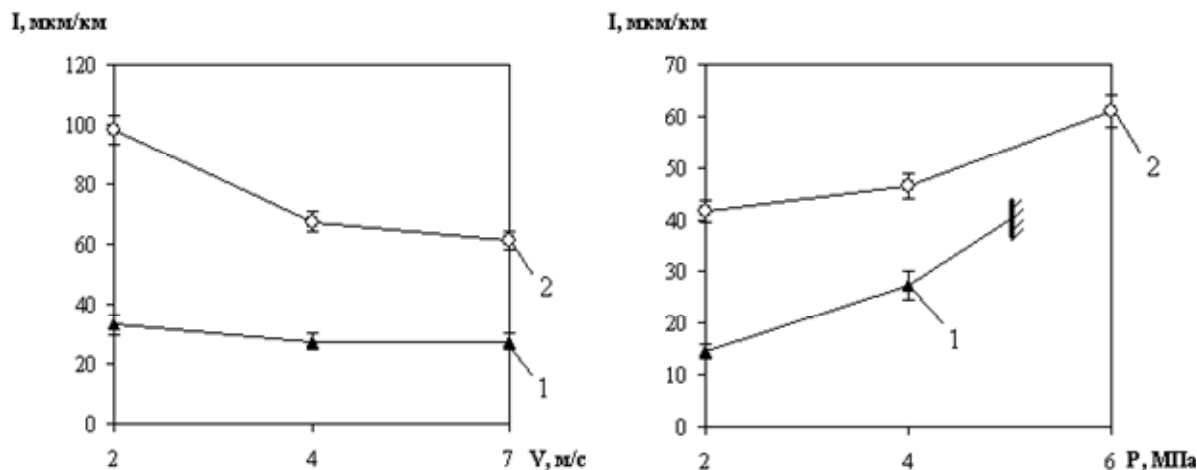
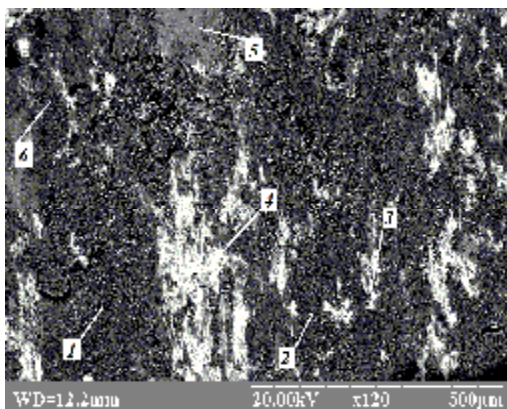


Рис. 3 – Зависимость интенсивности изнашивания от скорости (а) и нагрузки (б):
1 – детонационное покрытие системы (SiC-Al₂O₃)-Fe;
2 – закаленная сталь 45

Для объяснения полученных результатов поверхности трения образцов с покрытием полученных в экстремальных условиях трения покрытия ($V = 7$ м/с, $P = 6$ МПа) были исследованы на электронном микроскопе РЭМ-106И. Структура зоны трения композиционных покрытий представляет собой двухфазную систему, состоящую из двух участков (рис. 4). Темные участки представляют собой системы оксидов кремния, алюминия и железа с включениями свободного углерода, что подтвердил дополнительно проведенный рентгенофазовый анализ. Светлые участки представляют собой низшие оксиды железа, перенесенные с поверхности контртела. Также на этой поверхности были обнаружены участки адгезионного отрыва покрытия от подложки (спектры 5 и 6 рис. 4).



Спектр	C	O	Al	Si	Fe
Спектр 1	16,08	33,44	12,45	12,89	25,14
Спектр 2	10,07	31,14	20,86	10,77	27,16
Спектр 3	-	52,12	-	-	47,88
Спектр 4	-	54,02	-	-	45,98
Спектр 5	0,03	-	-	-	99,99
Спектр 6	0,04	-	-	-	98,99

Рис. 4 – Микроструктура $\times 120$ участка дорожки трения детонационного покрытия с указанием участков микрорентгеноспектрального анализа

Таким образом, в результате анализа поверхностей трения композиционного покрытия по стальному контртелу без смазочных материалов можно констатировать реализацию окислительного механизма изнашивания и формирования на поверхности трения стекловидных пленок тройных оксидных систем: оксидов алюминия, кремния и железа. Наличие свободного углерода, выделившегося в результате окисления карбида кремния существенно снижает коэффициент трения полученных покрытий. А пределы износостойкости покрытия определяются особенностями напряженно деформированного состояния системы «покрытие-подложка», и определяются адгезионными свойствами покрытия к стальной поверхности. Этот недостаток может быть устранен применением подслоя или изменением методов нанесения покрытия, что может быть предметом дальнейших исследований.

Выводы

1. Получены новые композиционные металлокерамические детонационные покрытия системы (SiC – Al₂O₃) – Fe на среднеуглеродистой стали. Структура этих покрытий представляет собой композиционную керамическую матрицу Al₂O₃ в которой равномерно распределены зерна SiC и включения фаз на основе железа типа силицидов и силикатов. Толщина покрытия варьируется в пределах 150 - 300 мкм.

2. Исследованы триботехнические характеристики детонационных покрытий в широком диапазоне нагрузочно-скоростных параметров, установлено, что при наиболее жестких принятых режимах испытаний ($P = 4$ МПа и $V = 7$ м/с) интенсивность изнашивания покрытия составляет 27,4 мкм/км, что в 2 раза превышает износостойкость стали. Установлены механизмы изнашивания этих покрытий и предельные нагрузочно-скоростные режимы износостойкости этих покрытий.

Литература

1. Уманский А.П., Довгаль А.Г., Панасюк А.Д., Костенко А.Д. Влияние состава и структуры керамики на основе карбида кремния на механизмы изнашивания. // Порошковая металлургия. – 2012. – № 7/8. – С. 92-102.

2. Уманский А.П., Довгаль А.Г., Костенко А.Д. Влияние состава и структуры карбидокремниевых композитов на износостойкость и механизмы их изнашивания при трении в паре с керамическим контртелом. // Проблемы трибології. – 2011. – № 3. – С. 81-88.

3. Панасюк А.Д., Уманский А.П., Довгаль А.Г. Исследование контактного взаимодействия керамики SiC-Al₂O₃ с никелем, алюминием и никель-алюминиевыми сплавами // Адгезия расплавов и пайка материалов. – 2010 – № 43. – С. 55-63.

4. Уманский А.П., Довгаль А.Г., Кисель В.М., Евдокименко Ю.И. Структура и закономерности изнашивания покрытий из композиционных металлокерамических материалов системы (SiC–Al₂O₃)–(Ni–Al) // Сверхтвердые материалы. – 2012. – № 2. – С. 49-57.

5. Уманский А.П., Довгаль А.Г., Субботин В.И., Тимофеева И.И., Мосина Т.В., Полярус Е.Н. Влияние времени размола на структуру и износостойкость керамических материалов на основе SiC–Al₂O₃ // Порошковая металлургия. – 2013. – № 3/4. – С. 92-100.

6. Довгаль А.Г. Влияние времени размола на структуру и износостойкость керамических материалов системы SiC–Al₂O₃ в паре с керамическим контртелом // Проблемы трибології. – 2012. – №1. – С. 20-26.

7. Лахин А.В. Процессы получения композиционных материалов и покрытий на основе карбида кремния химическим газофазным осаждением из метилсилана при относительно низких температурах и давлениях // Дисс. на соиск. уч. степени. к.т.н., по спец. 05.16.06 Порошковая металлургия и композиционные материалы – М.: 2006. – 140 с.

8. Филонов К.Н., Курлов В.Н., Классен Н.В., Кудренко Е.А., Штейнман Э.А. Особенности свойств наноструктурированных карбидокремниевых пленок и покрытий, полученных новым способом // Известия РАН. – Серия физическая. – 2009. – Том 73. – № 10. – С. 1457-1459.

9. Фараджаллах М.А. Износостойкость детонационных покрытий на основе карбида кремния, содержащих молекул свинца // Проблемы техники – № 3. – 2009. – С. 40-46.

Поступила в редакцію 15.10.2013

Dovgal A. G. Structure and tribotechnical properties of the detonation coatings based on the components SiC-Al₂O₃ together with the steel counterbody without lubricants.

In a principally new way the ceramic-metal composition material based on the components SiC-Al₂O₃ which contains the metallic constituent of the iron, not introduced in to the initial batch mixture in form of powder, and that is acquired in result of batch mixture components grinding in the steel vessels with steel milling bodies has been acquired. The acquisitions possibility of gas-flame coatings made of this ceramic-metal substance on the steel items for their superficial repair and reinforcement has been investigated. Optimal modes of these coatings depositions of this material by detonation method have been found. Using the method of electron microscopy and focused-beam microscopy, X-ray spectrometry analysis and X-ray phase analysis the structure of the coatings made of the composition material containing the wearproof component SiC-Al₂O₃ and metallic bound of iron acquired in a result of batch mixture grinding in the steel vessels on the mild carbon steel has been studied. The tribotechnical properties of the coatings within the friction conditions without lubricants in air together with steel counterbody have been researched and application limits of the acquired coatings have been found. Using the methods of electron microscopy the friction surfaces of the acquired coating have been researched and features and regularities of their wear mechanism have been detected.

Key words: coating, ceramics, wetting, millings, detonation deposition, wear resistance.

References

1. A. P. Umanskii, A. G. Dovgal', A. D. Panasyuk, and A. D. Kostenko Effect of the composition and structure of silicon carbide composites on wear mechanisms // Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 51, Nos. 7-8, November, 2012- pp. 447-455.
2. Umanskyi A. P., Dovgal A. G., Kostenko A. D. Influence of composition and structure of silicon carbide composites on wear resistance and their wear mechanisms during friction together with a ceramic counterbody // Problems of Tribology. – 2011. - № 3. – P.P. 81– 88.
3. Panasyuk A. D., Umansky A. P., Dovgal A. G. Research of contact interaction of ceramic SiC-Al₂O₃ with nickel, aluminium and nickel-aluminium alloys. // Adhesion of melts and materials soldering. – 2010. – №43. – P.P. 55–63.
4. A. P. Umanskii, A. G. Dovgal', V. M. Kisel', and Yu. I. Evdokimenko Structure and Wear Regularities of Coatings from Composite Metal-Ceramic Materials of the SiC–Al₂O₃–Ni–Al System // Journal of Superhard Materials. – 2012. – Vol. 34. – No. 2. – pp. 110–117.
5. A. P. Umanskii, A. G. Dovgal', V. I. Subbotin, I. I. Timofeeva, T. V. Mosina and E. N. Polyarys Effect of grinding time on the structure and wear resistance of SiC–Al₂O₃ceramics // Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 52, Nos. 3-4, July, 2013- pp. 189-196.
6. Dovgal A. G. Influence of grinding time on a structure and wear resistance of ceramic materials on the basis of the system SiC-Al₂O₃ together with a ceramic counterbody // Problems of Tribology. – 2012. – №1. – P.P. 20-26.
7. Lakhin A. V. Acquisition processes of composition materials and coating based on the silicon carbide using the chemical heterophase deposition from methyl-silane having comparatively low temperatures and pressures // Degree thesis of candidate of engineering on specialty 05.16.06 Powder metallurgy and Composition Materials. – M.: 2006. – 140 p.
8. Fylonov K. N., Khurlov V. N., Klassen N. V., Khudrenko Ye. A., Shteynman E. A. Properties features of nano-structured silicon carbide films and coatings, acquired in the new way // Proceedings of Russian Academy of Sciences. Physical series. 2009, vol. 73, No 10, p.p. 1457–1459.
9. Farajallakh M. A. Wear resistance of the detonation coatings based on the silicon carbide alloyed by lead molybdate // Problems of Engineering, - № 3. – 2009, p.p. 40-46.