

Терентьев А.Е.Институт проблем материаловедения
им. И.Н.Францевича НАН Украины,
г. Киев, Украина
E-mail: terentjev.alex@gmail.com**ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ
ПОКРЫТИЙ NiCrBSi - TiB₂**

УДК 620.198.533.9 (045)

В работе исследованы триботехнические характеристики плазменных покрытий из композиционных порошковых материалов (КПМ) на основе самофлюсующегося сплава дисперсно-упрочненного добавками диборида титана в концентрационном диапазоне 10 - 40 мас.% (НХТБ 10 ÷ 40). Испытания проводились в условиях трения скольжения без смазывающего материала в паре с плазменным покрытием из электрокорунда (Al₂O₃) по схеме «вал – частичный вкладыш» при скорости $V = 6,0$ м/с и нагрузке $P_{\text{до}} = 1$ МПа.

Установлено, что гетерофазная структура покрытий из композиционных материалов за счет высокой твердости упрочняющих фаз (10,7 - 25,4 ГПа) способствует высокой износостойкости пар трения «плазменное покрытие из КПМ НХТБ (10 ÷ 40) – плазменное покрытие Al₂O₃», также как и исследованных ранее пар трения НХТБ (10 - 40) – сталь ШХ15. Пары трения НХТБ – Al₂O₃ имеют более высокую износостойкость, чем пары НХТБ - ШХ15. Наилучшие триботехнические показатели у пары трения НХТБ-20 – Al₂O₃ (линейный износ – 8,5 мкм/км, $f_{\text{тр}} = 0,3$). В парах трения НХТБ (10 ÷ 40) – Al₂O₃ весовой износ контртела (покрытие из электрокорунда) преобладает над износом покрытия НХТБ, в отличие от пары трения НХТБ-20 – ШХ15. Этот факт необходимо учитывать при проектировании узлов трения из рассмотренных материалов. Перспективным путем повышения износостойкости пар трения НХТБ (10 ÷ 40) – Al₂O₃ является увеличение адгезионной связи частиц в покрытии за счет использования высокоскоростных методов нанесения, таких как детонационное и высокоскоростное воздушно-топливное напыление.

Ключевые слова: самофлюсующийся сплав, тугоплавкое соединение, композиционный порошковый материал, плазменное напыление, покрытие, трение, линейный износ, износостойкость.

Введение

Одним из эффективных способов повышения износостойкости узлов трения различных механизмов в настоящее время является нанесение защитных газотермических покрытий. Применение покрытий позволяет существенно повысить ресурс и надежность деталей работающих в условиях высоких нагрузок и скоростей скольжения, в условиях трения с ограниченной смазкой и присутствием абразивных включений, при повышенной температуре и агрессивности среды. Перспективными, для подобных покрытий, являются композиционные порошковые материалы (КПМ) на основе самофлюсующихся сплавов дисперсно-упрочненные добавками из тугоплавких соединений карбидов и боридов переходных металлов IV - VI групп периодической таблицы [1, 2].

Важнейшей задачей при конструировании узлов трения является обеспечение высокой износостойкости не отдельной детали, а пары трения в целом. Подбор оптимальной пары довольно сложная задача, которую зачастую возможно решить лишь экспериментальным путем. Ускорить процесс подбора пары трения возможно проведением сравнительных испытаний на трибометрах, позволяющих определять основные характеристики испытываемых материалов – линейный и весовой износ, коэффициент трения, температуру в зоне контакта. При этом условия испытаний (схема сопряжения, величина нагрузки, скорости скольжения, наличие или отсутствие смазки и др.) должны быть максимально приближены к условиям эксплуатации реальной пары трения.

Ранее, в работах [3, 4] исследовались структура, химический и фазовый состав, а также триботехнические характеристики газотермических покрытий из КПМ на основе сплава ПГСП-3 упрочненного добавками диборида титана в паре со сталями 65Г и ШХ-15. Было установлено, что наилучшей износостойкостью в условиях трения скольжения без смазки, из числа рассмотренных, обладает покрытие ПГСП-3 + 20%TiB₂ (НХТБ-20) в паре со сталью ШХ15.

Цель и постановка задачи

Данная работа – следующий этап исследований, направленных на определение оптимальных пар трения, работающих в условиях трения скольжения без смазки и её целью является исследование триботехнических характеристик плазменных покрытий из КПМ системы «самофлюсующийся сплав (Ni-Cr-B-Si) – тугоплавкое соединение (TiB₂)» в паре с керамическим покрытием на основе Al₂O₃.

Методика и материалы

Для исследуемых плазменных покрытий использовались порошки НХТБ-10, НХТБ-20 и НХТБ-40, которые представляют собой КПМ на основе самофлюсующегося эвтектического сплава мар-

ки ПР-НХ16СРЗ состава (Cr – 16 %, Si – 2,7 %, В – 3,2 %, Fe – до 5 %, С – 0,75 %, Ni – осн.) с добавками 10, 20 и 40 мас. % TiB₂ соответственно, полученные методом жидкофазного спекания в вакууме с последующим измельчением и классификацией. Технология получения, структура, химический и фазовый состав КПП и плазменных покрытий из них описаны в [3, 5].

В качестве пары трения для исследуемых покрытий использовалось плазменное покрытие из электрокорунда нормального марки 15А (ГОСТ 28818-90) состава (Al₂O₃ – осн., Fe₂O₃ – 0,4 %, TiO₂ – 1,8 %, CaO – 0,5 %).

Покрытия на образцы и контртела из стали 3 наносились в открытой атмосфере плазменным способом плазмотроном F4-МВ фирмы Metco. В качестве плазмообразующего газа использовалась смесь аргона с водородом. Режимы нанесения покрытий представлены в таблице 1.

Таблица 1

Режимы нанесения плазменных покрытий

№ п/п	Материал покрытия	Состав, %.	Напряжение, (В)	Ток, (А)	Расход газа, (л/мин)	Дистанция, мм	Толщина, мм
1	НХТВ-10	ПР-НХ16СРЗ +10%TiB ₂	65	450	40	160	0,6
2	НХТВ-20	ПР-НХ16СРЗ +20%TiB ₂	65	480	40	160	0,5
3	НХТВ-40	ПР-НХ16СРЗ +40%TiB ₂	70	500	42	150	0,5
4	Электрокорунд	Al ₂ O ₃ – осн., Fe ₂ O ₃ – 0,4%, TiO ₂ – 1,8%, CaO – 0,5%	70	550	40	120	0,6

Перед нанесением покрытий поверхность подложки подвергалась струйно-абразивной обработке порошком электрокорунда нормального марки 12А (ГОСТ 28818-90) зернистостью F22 - F24 (ISO 8486-86) с целью её очистки, активации и придания шероховатости Rz 63 - Rz 80 для увеличения адгезии. Обработка поверхности осуществлялась с расстояния 90 - 150 мм под углом 60 ° - 90 ° сжатым воздухом под давлением 0,5 - 0,7 МПа. Кроме того, для увеличения адгезии покрытия на подложку наносились через промежуточный слой из термореагирующего материала ПГ-Ю5-Н (Россия) состава - 95% Ni + 5,2% Al (ISO 9001: 2008) зернистостью (- 100 + 40) мкм.

Структурно-фазовый состав полученных покрытий исследовался с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ-106, а химический состав пленок на дорожках трения с помощью ОЖЭ-спектрометра JEOL JAMP 9500.

Исследование процесса изнашивания газотермических покрытий из композиционных материалов НХТВ проводилось в условиях трения скольжения без смазки по схеме «вал - частичный вкладыш» на машине трения М-22м, разработки ИПМ им. И.М. Францевича НАН Украины, конструкция которой позволяет в процессе эксперимента измерять одновременно линейный износ пары, коэффициент трения и температуру в зоне контакта пары трения. Весовой износ образца и контртела определялся взвешиванием через каждый километр пути трения.

В качестве контртела (вал) использовался диск Ø = 40 мм с плазменным покрытием из электрокорунда. В качестве образца (вкладыш) – стержень Ø = 5 мм с покрытием из КПП НХТВ толщиной 0,5 - 0,7 мм. Предварительная приработка покрытия проводилась на алмазном круге, который устанавливался вместо диска и имел аналогичные размеры. После того как образец приобретал поверхность сопряженную с диском, устанавливалось контртело и на нем покрытие прирабатывалось окончательно. Для получения достоверных сопоставимых результатов испытания всех покрытий проводились в одинаковых условиях. Величина нагрузки составляла $P_{\text{уб.}} = 1$ МПа, длина пути трения $L = 5$ км, скорость скольжения $V = 6,0$ м/с.

Результаты исследований и их обсуждение

Плазменные покрытия из разработанных КПП НХТВ имеют гетерофазную структуру (рис. 1), которая представляет собой металлическую матрицу из сплава на основе Ni с равномерно распределенными в ней зернами упрочняющих фаз сложных боридов хрома, карбоборидов титана-хрома и карбида титана, синтезированных во время жидкофазного спекания, а также диборида титана, введенного в состав КПП [6]. Эти фазы имеют высокую микротвердость 10,7 - 25,4 ГПа и играют важную роль в повышении износостойкости покрытия, поскольку в процессе трения несут на себе основную нагрузку.

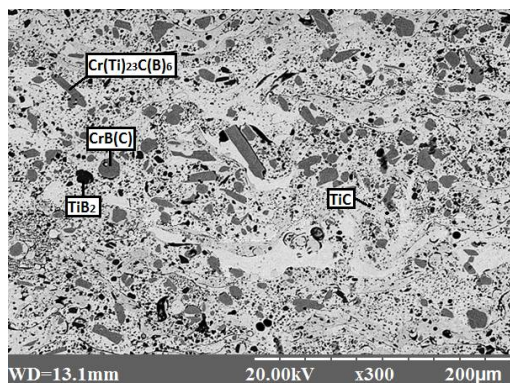


Рис. 1 – Структура плазменного композиционного покрытия НХТБ – 20

Проведенные в условиях трения скольжения без смазки исследования триботехнических характеристик плазменных композиционных покрытий НХТБ-10, 20 и 40 в паре со сталью ШХ15 показали их высокую износостойкость. Наилучшими характеристиками из них обладает покрытие НХТБ-20. Линейный износ пары составил 24,8 мкм/км (рис. 2), а весовой износ покрытия и контртела 2,8 мг/км и 1,5 мг/км соответственно (рис. 3). Исследования дорожек трения позволили установить, что в этой паре преобладающим является окислительный механизм изнашивания. На поверхности дорожек трения образца и контртела были обнаружены полиоксидные пленки сложного состава на основе оксидов NiO, B₂O₃, Cr₂O₃ и TiO₂, толщиной 10 - 30 нм. В то же время, на поверхности матричного материала композиционных покрытий НХТБ присутствуют локальные участки с признаками адгезионного схватывания трущихся поверхностей. Следует отметить, что размеры и количество таких участков незначительны и процессы схватывания не оказывают существенного влияния на механизм изнашивания в этих парах трения.

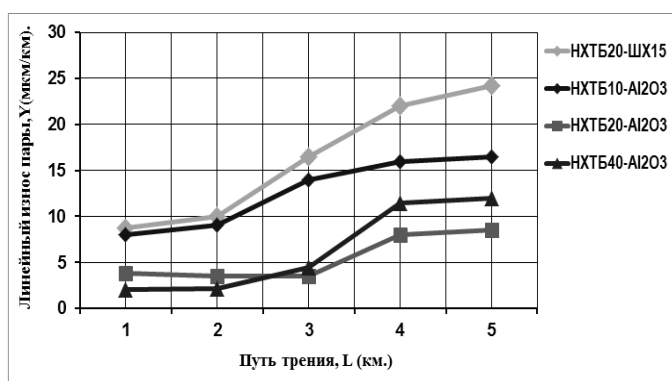


Рис. 2 – Зависимость линейного износа плазменных композиционных покрытий НХТБ 10 -40 в паре со сталью ШХ15 и покрытием из электрокорунда от пути

Исследованиями триботехнических характеристик композиционных плазменных покрытий НХТБ-10, 20 и 40 в паре трения с плазменным покрытием из электрокорунда нормального (~ 97% Al₂O₃) установлено, что все три состава имеют высокую стойкость к изнашиванию (рис. 2). Во всех случаях линейный износ пары трения не превышает 16,5 мкм/км и ниже, чем в паре трения покрытие НХТБ-20 – сталь ШХ15. Наиболее высокая износостойкость (8,5 мкм/км) у пары трения с участием покрытия НХТБ-20, как и в случае трения покрытий НХТБ-10, 20 и 40 по стали ШХ15. Этот факт может свидетельствовать о том, что количество упрочняющей добавки TiB₂ порядка ~ 20 % в этой системе КПМ близко к оптимальному. В паре НХТБ-40 – Al₂O₃ на пути трения 1 - 3 км линейный износ наименьший, но при дальнейшем увеличении пути трения износ увеличивается до 12 мкм/км, что выше, чем у пары НХТБ-20 – Al₂O₃. Этот эффект, возможно, объясняется двумя причинами. Во-первых – выкрашиванием микрочастиц упрочняющей фазы из покрытия в процессе трения вследствие недостаточности матричного материала при таком соотношении компонентов в составе КПМ НХТБ-40 и является весьма нежелательным, поскольку приводит к преобладанию абразивного механизма изнашивания в паре трения. Во-вторых – тем, что в этой паре контртело изнашивается покрытием интенсивней, чем в других парах

(рис. 3). Избежать выкрашивания частиц можно путем повышения их адгезионной связи в покрытии, используя другие газотермические способы нанесения покрытий, например высокоскоростное воздушно-топливное (ВВТН) или детонационное напыление. Возможно, покрытие НХТБ-40, нанесенное одним из этих способов, будет иметь наилучшие показатели износостойкости среди покрытий, рассматриваемых в данной работе. Поведение триботехнических испытаний покрытий НХТБ, нанесенных ВВТН и детонационным способами в паре с Al₂O₃ является предметом дальнейших исследований автора.

Положительным является тот факт, что в парах трения НХТБ-10, 20 и 40 – Al₂O₃, в отличие от пары НХТБ-20 – ШХ15 линейный износ в конце пути трения стабилизируется и практически перестает увеличиваться.

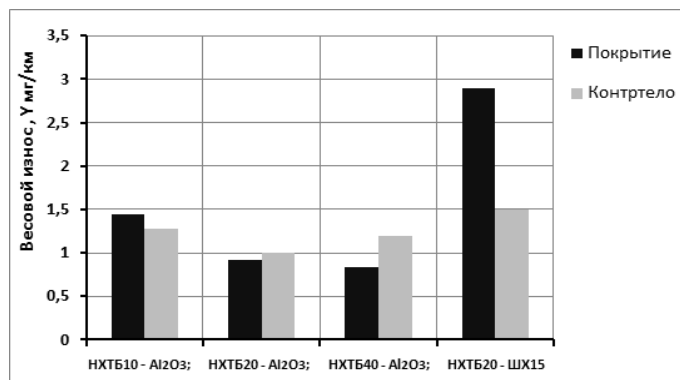


Рис. 3 – Весовой износ в парах трения – «плазменное композиционное покрытие НХТБ 10 - 40 – электрокорунд» и «плазменное композиционное покрытие НХТБ-20 – сталь ШХ15»

Весовой износ в парах трения НХТБ-10, 20 и 40 – Al₂O₃ во всех случаях ниже, чем в паре НХТБ-20 – ШХ15. С увеличением содержания в композите упрочняющей добавки TiB₂ весовой износ покрытия уменьшается, а относительный износ контртела увеличивается по сравнению с износом покрытия. Наименьший износ у покрытия НХТБ-40 (0,84 мг/км). Контртело меньше изнашивается в паре с покрытием НХТБ-20, при этом весовой износ покрытия и контртела имеют близкие значения (0,92 и 1,0 мг/км соответственно). Учитывая тот факт, что площадь трения образца с покрытием в несколько раз меньше площади трения контртела, можно сделать вывод, что во всех случаях контртело (покрытие из электрокорунда) изнашивается более интенсивно, чем покрытие НХТБ. В случае пары трения НХТБ-20 – ШХ15 наоборот относительный износ покрытия выше, чем износ контртела.

Коэффициент трения во всех исследованных парах находится в пределах 0,3 - 0,47 (рис. 4). Такие значения являются характерными для подобного класса материалов и условий испытаний.

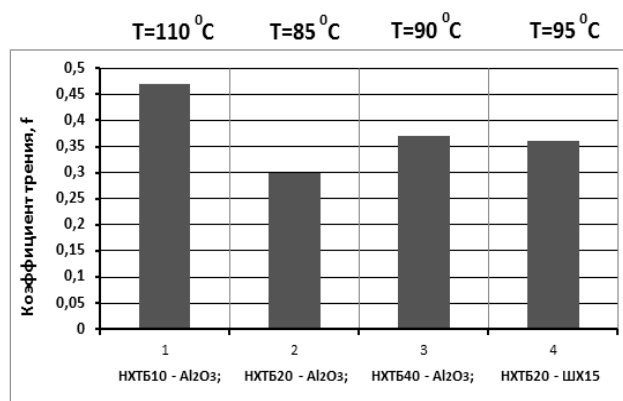


Рис. 4 – Коэффициент трения и температура в зоне контакта пар трения:
 1 – НХТБ10 – электрокорунд;
 2 – НХТБ20 – электрокорунд;
 3 – НХТБ40 – электрокорунд;
 4 – НХТБ20 – ШХ15;

Наибольшие коэффициент трения (0,47) и температура в зоне контакта (110 °C) отмечаются у пары НХТБ-10 – Al₂O₃, а наименьшие у НХТБ-20 – Al₂O₃ (0,29 и 85 °C соответственно).

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что плазменные покрытия из КПМ НХТБ – 10, 20 и 40 в условиях трения скольжения без смазывающих материалов имеют более высокую износостойкость в паре с плазменным покрытием из электрокорунда нормального (Al₂O₃), чем в паре со сталью ШХ15. Наименьший линейный износ наблюдается в паре трения НХТБ-20 – Al₂O₃ (8,5 мкм/км).

Весовой износ покрытия в парах трения НХТБ-10, 20 и 40 – Al₂O₃ во всех случаях имеет меньшие значения, чем в паре НХТБ-20 – ШХ15. Наименьший весовой износ у покрытия НХТБ-40. С увеличением содержания в КПМ упрочняющей добавки TiB₂ с 10 до 40 мас.% весовой износ покрытия уменьшается.

В парах трения НХТБ-10, 20 и 40 – Al₂O₃ износ контртела (покрытие из электрокорунда) преобладает над износом покрытия НХТБ, в отличие от пары трения НХТБ-20 – ШХ15. Этот факт необходимо учитывать при проектировании узлов трения из рассмотренных материалов.

Перспективным путем повышения износостойкости пар трения НХТБ (10 ÷ 40) – Al₂O₃ является увеличение адгезионной связи частиц в покрытии за счет использования высокоскоростных методов нанесения, таких как детонационное и высокоскоростное воздушно-топливное напыление.

Литература

1. Кулик А.Я. Газотермическое напыление композиционных порошков [Текст] / А.Я. Кулик, Ю.С. Борисов, А.С. Мнухин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 197 с.
2. Pavlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings [Text] / L. Pavlovski. – Chichester: John Willey & Sons, 2008. – 626 P.
3. Уманский А.П. Влияние добавок TiB₂ на структуру и свойства плазменных покрытий на основе NiCrSiB [Текст] / А.П. Уманский, А.Е. Терентьев, М.С. Стороженко, А.А. Бондаренко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 10 (97). – С. 50-54.
4. Влияние дисперсных добавок диборида титана на структуру и свойства HVOF - покрытий системы (Ni-Cr-Si-B) – TiB₂ [Текст] / А.П. Уманский, А.Е. Терентьев, М.С. Стороженко и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 9 (106). – С. 188-194.
5. Уманский А.П. Исследование закономерностей влияния мелкодисперсных добавок TiB₂ на формирование структурно-фазового состава композиционных порошков и покрытий системы NiCrSiB - TiB₂ [Текст] / А.П. Уманский, А.Е. Терентьев, М.С. Стороженко, И.С. Марценюк // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". – Луцьк. – 2013. – Вип. № 41, ч. 2. – С. 213 – 221.
6. Терентьев А.Е. Исследование влияния состава, технологии получения и способа нанесения композиционного порошка на основе сплава системы (Ni-Cr-Si-B) на износостойкость газотермических покрытий в условиях трения без смазочного материала [Текст] / А.Е. Терентьев // Проблеми трибології. – 2014. – № 1 – С. 77 – 83.

Поступила в редакцію 16.11.2015

Terentjev A.E. **Plasma sprayed composite material NiCrSiB-TiB₂ coatings tribotechnical characteristics.**

The aim of the study is to investigate the tribotechnical characteristics of plasma sprayed NiCrSiB-based self-fluxing alloy with titanium diboride additives (10 wt.%, 20 wt.% and 40 wt.%) coatings. The tests were conducted under dry sliding conditions against plasma sprayed corundum (Al₂O₃) coating by technique “shaft – partial liner” at sliding speed of 6 m/s and constant load of 1 MPa.

It has been determined that the heterogeneous structure of composite materials coatings provides the high wear resistance of friction couples “plasma sprayed NiCrSiB-based coating with TiB₂ additives (10 wt.%, 20 wt.% and 40 wt.%) - plasma sprayed Al₂O₃ coating”, as the previously investigated couples “NiCrSiB-based coating with TiB₂ additives (10 wt.%, 20 wt.% and 40 wt.%) – Steel 15”, because of composite material reinforcement phases hardness (10,7 - 25,4 GPa). The best tribotechnical characteristics were shown by the couple “NiCrSiB-TiB₂ (20 wt.%) - Al₂O₃ (linear wear – 8,5 μm/km, fmp – 0,3). In all investigated couples, such as “NiCrSiB-TiB₂ (10 wt.%, 20 wt.% and 40 wt.%) - Al₂O₃” the wear rate is less than in couple “NiCrSiB-TiB₂ (20 wt.%) – Steel 15”. It has been determined that the addition of titanium diboride from 10 wt.% - 40 wt.% into the NiCrSiB alloy results in increasing of coatings wear resistance. The wear of counter body of corundum coating in couple “NiCrSiB-TiB₂ (10 wt.%, 20 wt.% and 40 wt.%) - Al₂O₃” is proved to be dominated over the composite material wear, in contrast with the couple “NiCrSiB-TiB₂ (20 wt.%) – Steel 15”. This fact must be taken into account when developing the friction units of the considered materials.

Increasing of adhesion bond of particles in coatings by using the high-velocity methods of spraying, such as detonation and HVOF methods is the promising way of increasing the wear resistance of couples “NiCrSiB-TiB₂ (10 wt.%, 20 wt.% and 40 wt.%) - Al₂O₃”.

Keywords: gas thermal coatings, plasma spraying, high velocity air fuel spraying, wear resistance, self-fluxing alloy, composite powder, colmonoy, structure, phase content.

References

1. Kulik, A.Ja., Borisov Ju.S., Mnuhin A.S. Gazotermicheskoe napylenie kompozicionnyh poroshkov. L. Mashinostroenie, 1985. 197 P.
2. Pavlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. Chichester: John Willey & Sons, 2008. 626 P.
3. Umanskij, A.P. Terentjev A.E., Storozhenko M.S., Bondarenko A.A. Vliyanie dobavok TiB₂ na strukturu i svojstva plazmennyyh pokrytij na osnove NiCrSiB. Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya. 2012. № 10 (97). P. 50-54.
4. Vliyanie dispersnih dobavok diborida titana na strukturu i svojstva HVOF - pokrytij sistemi (Ni-Cr-Si-B) – TiB₂. A.P. Umanskij, A.E. Terentjev, M.S.Storozhenko i dr. Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya. 2013. № 9 (106). P. 188-194.
5. Issledovanie zakonornostej vlijaniya melkdispersnyh dobavok TiB₂ na formirovanie strukturno fazovogo sostava kompozicionnyh poroshkov i pokrytij sistemy (Ni-Cr-Si-B) - TiB₂. A.P. Umanskij, A.E. Terentjev, M.S.Storozhenko, I.S.Marcenjuk. Mizhvuzivs'kij zbirnik "NAUKOVI NOTATKI". Luc'k. 2013. Vipusk №41. Chastina 2. P. 213-221.
6. Terentjev A.E. Issledovanie vlijaniya sostava, tehnologii polucheniya i sposoba naneseniya kompozicionnogo poroshka na osnove splava sistemi (Ni-Cr-Si-B) na iznosostojkost gazotermicheskikh pokrytij v usloviyah treniya bez smazochnogo materiala. Problemy trybologii. № 1.– P. 77 - 83.