

УДК 622.5;621.9

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-10-29-36

О.Б. Сильченко, М.В. Силуянова, П.Н. Хопин

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КАРБОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ГАЗОДЕТОНАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Предложен метод исследования износостойкости покрытий из керамополимеров и композиционных материалов. Исследованы триботехнические материалы для применения в различных условиях

эксплуатации в зависимости от температуры, нагрузки и скорости скольжения.

Ключевые слова: покрытия, твердость, индентор, износостойкость, микротвердость.

O.B. Silchenko, M.V. Siluyanova, P.N. Khopin

MICRO-HARDNESS AND WEAR-RESISTANCE INVESTIGATION IN CARBO-METAL COATING COMPOSITES OBTAINED THROUGH GAS-DETONATION METHOD

The work purpose consists in the investigation of carbometal coatings wear-resistance and micro-hardness depending on chemical structure of their components.

The investigation object is carbide-metal coatings.

The result analysis of comparative wear-resistance tests witnesses that with micro-hardness increase in metal carbides of compositions: Cr_3C_2 , WC, TiC, TiCN, at a constant content of cladding metal (30...35mass %), a value of wear decreases according to the linear law.

Wear intensity of coatings of clad carbide mixtures with different materials is defined to a certain extent with wear intensity of material added to the matrix.

In the course of the work there were developed coating compositions reinforced with quasi-crystals, there is defined an optimum composition and modes of coating application with the gas-detonation method and their wear-resistance and micro-hardness were investigated.

Key words: coatings, hardness, indenter, wear-resistance, micro-hardness.

Введение

В современном машиностроении стоит задача получения износостойких покрытий, способных обеспечивать необходимые характеристики в тяжело нагруженных передачах. Материаловедение ставит цель – получение таких покрытий с различными характеристиками. Наиболее прогрессивными покрытиями являются карбометаллические покрытия из различных металлов. экспериментальные иссле-

дования по технологии получения данных покрытий является научной задачей современных ученых.

Цель работы – исследование износостойкости и микротвердости карбометаллических покрытий в зависимости от химического состава их компонентов..

Объект исследования – карбидометаллические покрытия.

Испытания на твердость

Твердость - это способность материала сопротивляться внедрению в его поверхность твердого тела - индентора. В качестве индентора используют закаленный

шарик или алмазный наконечник в виде конуса или пирамиды. На практике применяют три вида измерения твердости (рис. 1).

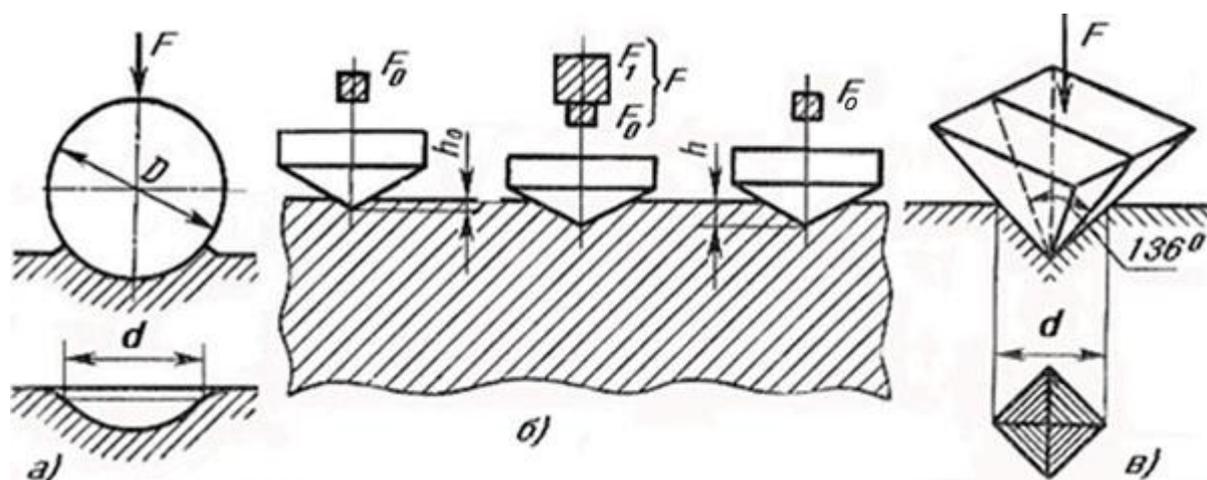


Рис. 1. Схема определения твердости по: а - Бринеллю; б – Роквеллу; в - Виккерсу

Микротвердость (ГОСТ 9450–76).

Микротвердость определяют вдавливанием в поверхность образца алмазной пирамиды при небольших нагрузках (0,05—5 Н) и измерением диагонали отпечатка. Число твердости определяют по той же формуле, что и вычисление числа твердости по Виккерсу. Определяется твердость отдельных зерен и структурных составляющих шлифа при металлографическом анализе, тонких слоев или тонких деталей.

В соответствии с *DIN 50133 (Vickers)* микротвердость определяют нагрузкой 0,98 Н ($HV_{0,1}$); 2,94 Н ($HV_{0,3}$); 4,91 Н ($HV_{0,5}$). Наиболее часто применяют $HV_{0,3}$.

Часто микротвердость используют для оценки качества газотермических по-

крытий (ГТП). По сути – это косвенная оценка плотности материала покрытия. Чем больше в слое покрытия пор, тем глубже внедряется индентор. Для оценки твердости мелкой многофазной структуры ГТП следует использовать способ Бринелля (для относительно мягких материалов, например, уплотнительных покрытий). Для твердых плотных покрытий (оплавленных самофлюсов с карбидной фазой) предпочтительнее использовать способ Виккерса (*HRC*). Для определения твердости керамических покрытий – способ Роквелла, так как керамика не сохраняет отпечаток индентора.

Оценка износостойкости покрытий

Наиболее широкое распространение при нанесении износостойких покрытий получили карбиды металлов с различными металлическими связками [1–8].

Область применения и возможность эксплуатации карбидометаллических покрытий, особенно при повышенных температурах в условиях сухого трения, во многом определяются свойствами карбидной составляющей жаростойкостью, твердостью и процентным содержанием карбида металла при нагреве.

Широко известны покрытия на основе карбида вольфрама. В сочетании с различными металлическими связками (чаще всего кобальтом) WC успешно применяет-

ся для нанесения износостойких покрытий, работающих при нормальных и повышенных температурах. Несмотря на высокие характеристики износостойкости, эти покрытия окисляются при температуре выше 773 К. Недостатком являются дефицитность вольфрамового сырья и его высокая плотность, что увеличивает вес всего узла.

Карбонитрид титана уступает по некоторым механическим характеристикам карбиду вольфрама, но отличается более высокой температурой плавления, микротвердостью, более высоким температурным коэффициентом расширения, большей жаростойкостью и не дефицитен как вольфрам. Покрытие состава карбонитрид ти-

тана - никель имеет удовлетворительную термостойкость до температур 900 К, при более высокой температуре в слое развиваются процессы окисления, существенно изменяющие состав напыленного покрытия, возможно образование интерметаллидов титана, отрицательно влияющих на его свойства.

Износостойкость покрытий на основе карбида хрома при нормальных температурах ниже, чем у покрытий на основе карбонитрида титана. Исследования пока-

зали, что максимальная износостойкость карбидно-металлических покрытий реализуется в определенном интервале температур [9–11].

Анализ результатов сравнительных испытаний износостойкости свидетельствует, что с увеличением микротвердости в карбидах металлов соединений: Cr_3C_2 , WC , TiC , $TiCN$, при постоянном содержании плакирующего металла (30...35 мас.%), величина износа покрытий убывает по линейному закону (рис. 2).



Рис. 2. Влияние микротвердости твердой фазы на величину интенсивности изнашивания покрытий (порошки плакированы никелем 30...35 мас.%)

Управление процессом нанесения покрытий и их свойствами осуществляется регулированием режима напыления, теплонпряженного состояния системы покрытие - деталь, подбором состава материала и смесей из композиционных порошков, чем обеспечивается высокий уровень служебных характеристик и надежности покрытий.

Напыление покрытий газодетонационным способом проводилось на установке АДУ «Обь». Сравнительные испытания покрытий проводились при трении без смазки на машине СМЦ-2 (рис. 3) по схеме диск - колодка при скорости вращения 300 об/мин и удельном давлении прижима 0,1 МПа.

Испытание без смазки является наиболее жестким и позволяет в ограниченное время выявить потенциальные возможности напыленного слоя. Скорость

вращения и удельное давление выбиралось таким образом, чтобы не допустить перегрева образцов при испытаниях.

Для проведения испытаний на износостойкость покрытие наносилось на диски диаметром 49,2 мм и шириной 12 мм. На отпескоструенную и обезжиренную поверхность дисков напылялся подслои ВН20 толщиной 0,15 мм и затем слой покрытия толщиной 0,7...0,9 мм на диаметр, чтобы обеспечить необходимый припуск на шлифовку образцов до окончательного размера 50_{-0,1} мм.

Толщина покрытия после шлифовки составляла 0,25...0,3 мм на сторону, шероховатость $Ra=0,63$ мкм.

Колодка изготавливалась из стали ШХ-15 и представляла собой сектор кольца с углом в $45^{\circ}\pm 30'$, наружным диаметром 68 мм, внутренним 50 мм и шириной 10 мм. После закалки до $HRC 55...63$ ед. ко-

лодочки шлифовались до шероховатости $Ra = 0,63$ мкм.

При проведении испытаний фиксировалось время испытаний, приложенная нагрузка и температура образцов. Температура образцов за счет трения при испытаниях достигала 600К. Износ шайбы и колодки определялся весовым методом. Взвешивание осуществляли на весах

CAUW220D с точностью измерения $0,5 \cdot 10^{-5}$ кг. Шайба взвешивалась через каждые два часа испытания, колодка - перед испытанием и после него. Перед каждым включением колодка и диск обезжиривались бензином Б-70. Испытания проводились в течение 8 часов, первые два часа, характеризующие стадию приработки, в расчет не принимались.



Рис. 3. Машина трения СМЦ-2 предназначена для испытаний материалов на трение и изнашивание при качении, качении с проскальзыванием и скольжении

Оценивалось влияние на интенсивность изнашивания вида твердой фазы, ее микротвердости и объемного содержания в слое. Как отмечалось ранее, с увеличением микротвердости карбидной фазы при постоянном содержании плакирующего металла (30...35 мас.%) интенсивность изнашивания покрытий убывает примерно по линейному закону (рис. 2).

Однако износостойкость покрытий определяется не только твердостью карбидного ядра, но количеством и видом матрицы. Увеличение содержания матрицы при напылении плакированных порошков карбидов можно получить при увеличении количества плакирующего металла. Проведенные ранее исследования о влиянии количества плакирующего металла на свойства покрытий на основе карбида хрома показали, что с увеличением содержания никеля от 15 % до 45 % интенсивность изнашивания снижается более чем в три раза, аналогичная зависимость наблю-

дается и для порошка карбида титана и карбонитрида титана.

Следовательно, увеличение объемного содержания матрицы в указанных пределах вызывает увеличение стойкости покрытий при сухом трении. Однако использование плакированных порошков с содержанием металла более 35...40 мас.% экономически и технологически нецелесообразно. Дальнейшее увеличение содержания матрицы целесообразно производить путем использования механических смесей плакированного порошка сложного карбида с различным содержанием и составом матричного материала. В качестве матричного материала может использоваться порошковый никель, нихром или НА67.

Исследовалась износостойкость покрытий в зависимости от состава матричного материала. Матричный материал вводился в виде примеси к плакированному порошку. Для исследования приготавлива-

лись механические смеси плакированного порошка с никелем (ПНЭ-3), хромоникелевым сплавом ПХ20Н80 и терморегулирующим порошком НА67.

Так как указанные матричные материалы имеют разную плотность, состав

$$y = \frac{10^5 P_{Т.Ф.} P_{Ni}(100-z)}{(100-n)zP_{Ni}P_M + P_{Т.Ф.}(100-z)(100P_{Ni} - nP_M)} \quad (1)$$

где y - содержание плакированного порошка в 1 кг смеси; P_{Ni} , P_M , $P_{Т.Ф.}$ - плотность никеля, матричного материала и твердой фазы, соответственно; n - содержание никеля в плакированной оболочке, %; z - объемное содержание матрицы, %.

В этом случае матрицей покрытий считался никель плакирующей оболочки частиц плюс добавка матричного материала до заданного объемного содержания матрицы. Исследовались покрытия с содержанием матрицы 55 %, 70 %, 85 %. Испытания покрытий на износостойкость проводились по той же методике, что и для плакированных порошков.

Испытания показали, что увеличение объемного содержания матрицы неоднозначно влияет на износостойкость покрытий и определяется видом матричного материала.

При добавлении к порошку КНТП-35Н металлического никеля до 50 об.%, интенсивность изнашивания покрытий остается на том же уровне, при дальнейшем увеличении объемного содержания никеля она несколько увеличивается и при 85 об.% составляет $1,2 \cdot 10^{-6}$ кг/ч. При дальнейшем увеличении содержания никеля она увеличивается до интенсивности изнашивания никеля, которая в условиях сухого трения превышает значения $10 \cdot 10^{-6}$ кг/ч (рис. 4).

Аналогичный характер зависимости наблюдается и при испытаниях покрытий из механических смесей плакированного карбонитрида титана с никелем, однако у всех рассматриваемых композиций интенсивность изнашивания больше, чем у аналогичных композиций с КНТП-35Н.

смеси рассчитывался так, чтобы объемное содержание матричного материала в покрытии было одинаковое. Расчеты выполнялись с использованием соотношения:

Использование в качестве матричного материала никеля плакирующей оболочки с добавками НА67 в области объемного содержания матрицы до 85% приводит к незначительным изменениям интенсивности изнашивания покрытий. В области значения 50 об.% она достигает $1,0 \cdot 10^{-6}$ кг/ч и находится на том же уровне значения до 85 об.%, а затем увеличивается до интенсивности изнашивания НА67 в данных условиях.

Значения зависимости интенсивности изнашивания от содержания никеля или НА67 в механической смеси для других карбидов (рис. 4).

Из рисунка видно, что для всех рассматриваемых композиций интенсивность изнашивания покрытий из механической смеси двух составляющих лежит в диапазоне между интенсивностью изнашивания плакированного карбида и НА67. Таким образом, интенсивность изнашивания покрытий из смеси плакированных карбидов с различными материалами в некоторой степени определяется интенсивностью изнашивания материала, добавляемого к матрице. Однако при исследовании покрытий, напыленных из смесей плакированных карбидов с порошком ПХ20Н80, с увеличением содержания матрицы Ni -ПХ20Н80 интенсивность изнашивания покрытий снижается. Для покрытий, содержащих КНТП-35Н, при объемном содержании матрицы 85 % она достигает $0,65 \cdot 10^{-6}$ кг/ч, а для покрытий, содержащих КХП-30Н - $1,2 \cdot 10^{-6}$ кг/ч, в то время как интенсивность изнашивания ПХ20Н80 составляет около $3,5 \cdot 10^{-6}$ кг/ч (рис. 5).

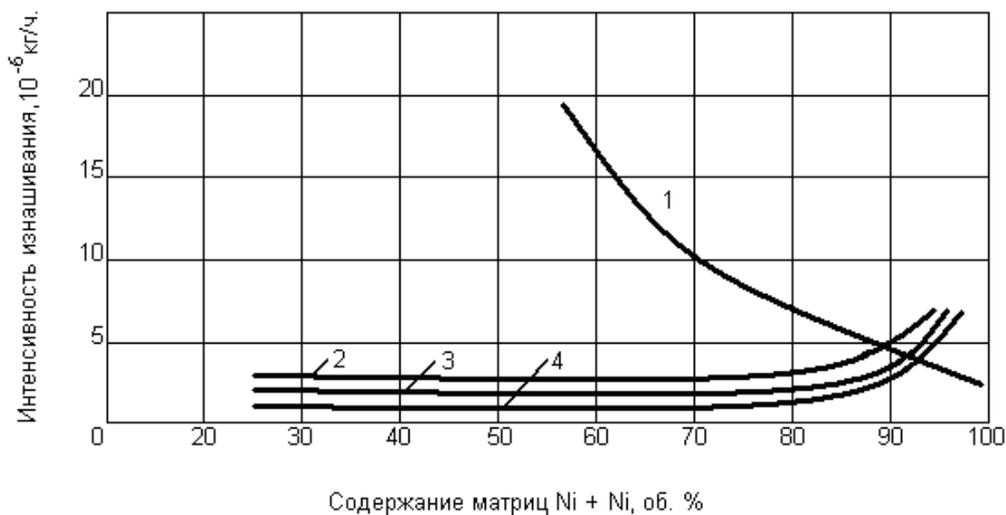


Рис. 4. Интенсивность изнашивания покрытий из смесей плакированных карбидов с порошковым никелем или НА67: 1 – карбид хрома, плакированный никелем; 2 – карбид вольфрама, плакированный никелем; 3 – карбид титана, плакированный никелем; 4 – карбонитрид титана, плакированный никелем.

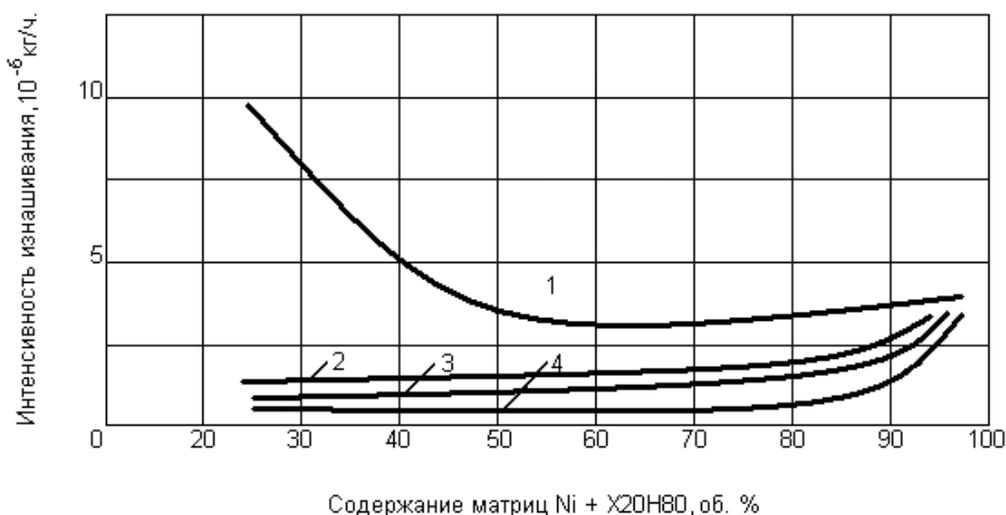


Рис. 5. Интенсивность изнашивания покрытий из смесей плакированных карбидов с порошковым никелем или НА67: 1 – карбид хрома, плакированный никелем; 2 – карбид вольфрама, плакированный никелем; 3 – карбид титана, плакированный никелем; 4 – карбонитрид титана, плакированный никелем.

Таким образом, увеличение объемного содержания матрицы до 85 об.% при добавлении к порошку КХТП-30Н НА67 и ПХ20Н80 приводит к изменению величины интенсивности изнашивания в пределах 20 %. При добавлении НА67 она несколько увеличивается, а при добавлении ПХ20Н80 - снижается. Применение смесей с порошковым никелем до 70 об.% дает те же результаты, что и добавление НА67.

В то же время изменение содержания матрицы позволит осуществлять согласование интенсивностей изнашивания покрытия и контртела.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработан класс триботехнических материалов для применения в различных условиях эксплуатации по температуре, скорости скольжения, нагрузке.

Выводы:

1. Анализ результатов сравнительных испытаний износостойкости свидетельствует, что с увеличением микротвердости в карбидах металлов соединений: Cr_3C_2 , WC , TiC , $TiCN$ при постоянном содержании плакирующего металла (30...35 мас.%), величина износа покрытий убывает по линейному закону.

2. Интенсивность изнашивания покрытий из смеси плакированных карбидов

с различными материалами в некоторой степени определяется интенсивностью изнашивания материала, добавляемого к матрице.

3. В результате проведенных исследований разработан класс триботехнических материалов для применения в различных условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Низовцев, В.Е. Некоторые оценки напряженно-деформированного состояния керамических композиционных материалов с учетом технологических пор / В.Е. Низовцев, О.Б. Сильченко, М.В. Силуянова и др. // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2018. - № 5. - С. 52-63.
2. Сильченко, О.Б. О перспективах применения наноструктурных гетерофазных полифункциональных композиционных материалов в авиадвигателестроении / О.Б. Сильченко, М.В. Силуянова, В.Е. Низовцев, Д.А. Климов, А.А. Корнилов // Вопросы материаловедения. - 2018. - №1. - С. 50-57.
3. Захаров, Б.М. О прочности сцепления покрытий, наносимых методом плазменного напыления / Б.М. Захаров, М.Г. Трофимов, Л.И. Гусева и др. // Порошковая металлургия. - 1970. - №11. - С. 71-76.
4. Гинзбург, Е.Г. Формирование контактной зоны покрытие подложка при газотермическом напылении / Е.Г. Гинзбург, О.С. Кобяков, В.А. Розанцев // Порошковая металлургия. - 1986. - №10. - С. 47-50.
5. Морозов, В.И. Технология напыления детонационных покрытий на основе оксида циркония, их свойства и применение / В.И. Морозов, Л.Т. Гордеева и др. // Тезисы докладов 10 Всесоюзного совещания «Теория и практика газотермического нанесения покрытий. – Дмит, 1985. - С. 37-39.
6. Харламов, Ю.А. Классификация видов взаимодействия частиц порошка с подложкой при

- нанесении покрытий/ Ю.А. Харламов // Порошковая металлургия. - 1988. - №1. - С. 18-22.
7. Федоренк, В.К. Влияние структурного фактора порошковых материалов на прочностные и пластические свойства детонационных покрытий типа ВК/ В.К. Федоренко, Р.К. Иващенко, В.Х. Кадыров и др. // Порошковая металлургия. - 1991. - №11. - С. 24-30.
 8. Балдаев, Л.Х. Технологии детонационного напыления в городском и жилищно-коммунальном хозяйстве. Инновационные процессы в регионах России/ Л.Х. Балдаев, М.Н. Буткевич, Б.Г. Хамицев : материалы Всеросс. науч.-практ. конф. – Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2005. - С. 119-129.
 9. Абузин, Ю.А. Исследование особенностей квазикристаллов при создании материалов для космоса, авиации, моторостроения и других отраслей народного хозяйства/ Ю.А. Абузин, А.С. Юдин : сб. докл. 1-го Всеросс. совещания по квазикристаллам. - ФГУП «ВИАМ», 2003. - С. 112-119.
 10. Рыбин, А.С. Изучение возможности практического использования квазикристаллов в качестве функциональных покрытий/ А.С. Рыбин, И.В. Улин, Б.Ф. Фармаковский и др. : сб. докл. 1-го Всеросс. совещания по квазикристаллам. - ФГУП ЦНИИКМ «Прометей», 2003. - С. 98-107.
 11. ОСТ 1.90371.87. Покрытия газотермические. Методы испытания физических свойств// Определение плотности и пористости. - М.: ВИАМ, 1987.

1. Nizovtsev, V.E. Some assessments of stress-strain state of ceramic composites taking into account technological pores / V.E. Nizovtsev, O.B. Silchenko, M.V. Siluyanov et al. // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2018. – No.5. – pp. 52-63.
2. Silchenko, O.B. On outlooks in application of nanostructural hetero-phase poly-functional composites in aircraft engine manufacturing / O.B. Silchenko, M.V. Siluyanov, V.E. Nizovtsev, D.A. Klimov,

- A.A. Kornilov // *Material Science Matters*. – 2018. – No.1. – pp. 50-57.
3. Zakharov, B.M. On adherence strength of coatings applied with plasma sputtering method / B.M. Zakharov, M.G. Trophimov, L.I. Guseva et al. // *Powder Metallurgy*. – 1970. – No.11. – pp. 71-76.
 4. Ginzburg, E.G. Formation of “coating-substrate” contact zone at gas-thermal sputtering / E.G. Ginzburg, O.S. Kobayakov, V.A. Rozantsev // *Powder Metallurgy*. – 1986. – No.10. – pp. 47-50.

5. Morozov, V.I. Technology of detonation coatings sputtering based on zirconium-oxide, their properties and use / V.I. Morozov, L.T. Gordeeva et al. // *Proceedings of the X-th All-Union Conf. "Theory and Practice of Gas-Thermal Coating Application"*. – Dmit, 1985. – pp. 37-39.
6. Kharlamov, Yu.A. Classification of interaction kinds of powder particles with substrate at coating application / Yu. A. Kharlamov // *Powder Metallurgy*. – 1988. – No.1. – pp. 18-22.
7. Fedorenko, V.K. Structural factor impact of powder materials upon strength and plastic properties of detonation coatings of VK type / V.K. Fedorenko, R.K. Ivashchenko, V.Kh. Kadyrov et al. // *Powder Metallurgy*. – 1991. – No.11. – pp. 24-30.
8. Baldaev, L.Kh. Detonation sputtering technologies in municipal and housing and communal services. Innovation processes in regions of Russia / L.Kh. Baldaev, M.N. Butkevich, B.G. Khamitsev: *Proceedings of All-Russian Scientific-Pract. Conf.* – Volgograd: VolgaSU Publishers, 2005. – pp. 119-129.
9. Abuzin, Yu.A. Investigations of quasi-crystal peculiarities at formation of materials for aerospace, engine industry and other branches of national economy / Yu.A. Abuzin, A.S. Yudin: *Proceedings of the 1-st All-Russian Conf. on Quasi-crystals*. – FSUP "VIAM", 2003. – pp. 112-119.
10. Rybin, A.S. Potentiality analysis in use of quasi-crystals as functional coatings/ A.S. Rybin, I.V. Ulin, B.F. Farmakovskiy et al.: *Proceedings of the 1-st All-Russian Conf. on Crystals*. – FSUP CRICM "Prometheus", 2003. – pp. 98-107.
11. OST 1.90371.87. Gas-thermal coatings. Test methods of physical properties // *Definition of Density and Porosity*. – M.: VIAM, 1987.

Ссылка цитирования:

Сильченко, О.Б. Исследование микротвердости и износостойкости карбометаллических покрытий из композиционных материалов, полученных газодетонационным методом / О.Б. Сильченко, М.В. Силуянова, П.Н. Хопин // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2020. - № 10. – С. 29-36. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-10-29-36.

Статья поступила в редакцию 20.05.20.

Рецензент: д.т.н., заместитель директора по научной работе Института материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН
Химухин С.Н.,
член редсовета журнала «Вестник БГТУ».
Статья принята к публикации 30.09.20.

Сведения об авторах:

Сильченко Ольга Борисовна, д.т.н., профессор, Московский авиационный институт, тел.: 8-926-181-07-88, e-mail: silyaolya@yandex.ru.

Силуянова Марина Владимировна, д.т.н., профессор, Московский авиационный институт, тел.: 8-916-612-83-54 e-mail: dc2mati@yandex.ru.

Silchenko Olga Borisovna, Dr. Sc. Tech., Prof., Moscow Aircraft Institute, phone: 8-926-181-07-88, e-mail: silyaolya@yandex.ru.

Siluyanov Marina Vladimirovna, Dr. Sc. Tech., Prof., Moscow Aircraft Institute, phone: 8-916-612-83 54, e-mail: dc2mati@yandex.ru.

Хопин Пётр Николаевич, д.т.н., доцент, Московский авиационный институт, тел.: 8-909-935-50-60, e-mail: chopinp@mail.ru.

Khopin Petr Nikolaevich, Dr. Sc. Tech., Assistant Prof., Moscow Aircraft Institute, phone: 8-909-935-50 60, e-mail: chopinp@mail.ru.