

Упрочнение покрытия плазменного напыления дисперсной дополнительной фазой карбида титана

Григорий И. Трифонов	¹	trifonov_gi@mail.ru	 0000-0002-7739-5587
Никита А. Пеньков	¹	grishakip@yandex.ru	 0000-0002-4644-3814
Анна А. Дерканосова	²	aa-derk@ya.ru	 0000-0002-9726-9262
Марина Н. Краснова	³	krasnovam27@mail.ru	

1 Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, 54А, г. Воронеж, 394064, Россия

2 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

3 Воронежский государственный технический университет, Московский просп., 14, г. Воронеж, 394000, Россия

Аннотация. На сегодняшний день в России одним из важнейших этапов развития аддитивных газотермических технологий является оптимальный выбор материалов. В частности, в области газотермических методов по нанесению композитных покрытий на поверхности деталей машин передовой и перспективной с точки зрения экономической выгоды и импортозамещения является технология плазменного напыления. В данной работе рассмотрен вопрос получения композитного покрытия с дополнительной дисперсной фазой (карбидом титана). Представлены результаты теоретических и практических исследований по особенностям упрочнения исследуемого композитного покрытия. Представлены расчеты напряжения сдвига согласно теориям Фишера-Харта-Прайя и Орована. Согласно актуальным ГОСТ определена прочность при сдвиге у исследуемого покрытия. По итогу работы исследована структура композитного покрытия из напыляемого материала 76,5% PR-NX17CP4+23,5% TiC, а именно: представлена структура напыленного композитного покрытия в оптической и растровой электронной микроскопии. Также проанализирован поперечный шлиф композитного покрытия, и сделаны выводы по природе его формирования. Дефекты нанесенного слоя композитного покрытия в виде трещин, локальных отслоений, крупных пор не обнаружено. Микрошлиф характеризуется высокой плотностью, равномерностью структуры, низкой пористостью, отсутствием трещин и высокой прочностью сцепления покрытия с основой. Составлены рекомендации по возможному использованию материала плазменного напыления (76,5% PR-NX17CP4+23,5% TiC), в частности при восстановлении изношенных поверхностей стоек шасси воздушных судов, и приводов рулевых механизмов военной и гражданской авиации. Данные рекомендации обоснованы ввиду высоких значений прочности при сдвиге исследуемого композитного покрытия.

Ключевые слова: композитное покрытие, дисперсная фаза, дислокация, карбид титана, плазменное напыление, упрочнение.

Hardening of the plasma spraying coating dispersed additional phase of titanium carbide

Gregory I. Trifonov	¹	trifonov_gi@mail.ru	 0000-0002-7739-5587
Nikita A. Penkov	¹	grishakip@yandex.ru	 0000-0002-4644-3814
Anna A. Derkanosova	²	aa-derk@ya.ru	 0000-0002-9726-9262
Marina N. Krasnova	³	krasnovam27@mail.ru	

1 The Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, 54A Starye Bolshevikov str., Voronezh, 394064, Russia

2 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

3 Voronezh State Technical University, Moskovsky Ave., 14, Voronezh, 394000, Russia

Abstract. Today in Russia, one of the most important stages in the development of additive gas-thermal technologies is the optimal choice of materials. In particular, in the field of gas-thermal methods for applying composite coatings on the surface of machine parts, plasma spraying technology is advanced and promising from the point of view of economic benefits and import substitution. In this paper, the issue of obtaining a composite coating with an additional dispersed phase (titanium carbide) is considered. The results of theoretical and practical studies on the peculiarities of hardening of the composite coating under study are presented. Calculations of shear stress according to the theories of Fischer-Hart-Pry and Orovan are presented. According to the current GOST, the shear strength of the coating under study is determined. As a result of the work, the structure of the composite coating from the sprayed material 76.5% PR-NX17CP4+23.5% TiC was investigated, namely: the structure of the sprayed composite coating in optical and scanning electron microscopy is presented. The transverse section of the composite coating is also analyzed, and conclusions are drawn on the nature of its formation. Defects of the applied layer of composite coating in the form of cracks, local delaminations, large pores were not detected. The microplate is characterized by high density, uniformity of structure, low porosity, absence of cracks and high adhesion strength of the coating to the substrate. Recommendations have been made on the possible use of plasma spraying material (76.5% PR-NH17CR4+23.5% TiC), in particular when restoring worn surfaces of aircraft landing gear racks and steering gear drives of military and civil aviation. These recommendations are justified due to the high shear strength values of the composite coating under study.

Keywords: composite coating, dispersed phase, dislocation, titanium carbide, plasma spraying, hardening.

Для цитирования

Трифонов Г.И., Пеньков Н.А., Дерканосова А.А., Краснова М.Н. Упрочнение покрытия плазменного напыления дисперсной дополнительной фазой карбида титана // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 3. С. 191–197. doi:10.20914/2310-1202-2022-3-191-197

For citation

Trifonov G.I., Penkov N.A., Derkanosova A.A., Krasnova M.N. Hardening of the plasma spraying coating dispersed additional phase of titanium carbide. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 3. pp. 191–197. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-3-191-197

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В рамках современного экономического курса и импортозамещения в Российской Федерации все большую популярность на производственных площадках авиа- и машиностроения набирает направление по разработке новых порошковых материалов с заданной структурой и физико-механическими свойствами с целью их нанесения на поверхности деталей машин газотермическими методами напыления. При этом стоит отметить, что эксплуатационные свойства формируемых покрытий в полной мере не зависят от толщины и заданного химического состава наносимого материала [1].

В большинстве случаев газотермическое нанесение функциональных материалов производят, используя технологию плазменного напыления. Плазменное напыление – универсальный и экономически выгодный технологический процесс по нанесению покрытий с заданными функциональными свойствами, который весьма подробно изучен и описан в трудах таких ученых, как Кудинов В.В. [2], Барвинок В.А. [3], Хасуй А. [4] и т. д. Конкурентные преимущества плазменного напыления заключаются в том, что данная технология позволяет повысить качество выпускаемой продукции и одновременно обеспечить сохранение окружающей среды. При этом в настоящее время в Германии функционируют порядка 2500 установок газотермического напыления, при этом Китай за последние годы произвел закупку более 1000 установок по напылению защитных покрытий для применения их у космической отрасли. Производственные компании России на данный момент активно используют технологии: восстановление деталей с помощью на их изношенные поверхности нанесения композитных покрытий [5], плазменное напыление покрытий с целью упрочнения поверхностей [6], нанесение полимерных композитных покрытий на рабочие поверхности ответственных деталей механизмов [7], а также гальванические методы нанесения композитных покрытий с целью восстановления и упрочнения [8] и т. д.

На основе анализа работ [2–8], был сделан вывод о том, что перспективным направлением по получению композитных покрытий с необходимыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами является именно плазменное напыление, поскольку свойства композитных материалов (покрытий) в основном зависят от сочетания их микроструктуры и параметров кристаллической решетки, формируемой при напылении, при котором используется транспортирующий и плазмообразующий газы [9].

Из чего следует, что проблема формирования композитных покрытий плазменным напылением не теряет своей актуальности, поэтому, самосмазываемые и износостойкие композитные покрытия все больше привлекают к себе внимание исследователей [10, 11].

Цель работы – изучить вопрос создания композитного покрытия с дополнительной дисперсной фазой, провести теоретические и практические исследования по особенностям упрочнения сформированного композита на основе стандартного самофлюсующегося сплава с дополнительным включением карбида титана.

Материалы и методы

Известно [12], что структура композитных покрытий представляет собой матрицу – основной компонент, которая содержит в своем объеме упрочняющую фазу – наполнитель (армирующий элемент). Чаще всего композиты классифицируют по их структуре, в частности, различают дисперсно-упрочненные, слоистые и волокнистые функциональные покрытия. При этом указанная классификация является весьма условной ввиду того, что получаемые композитные покрытия обычно включают в себя функциональные и структурные особенности сразу двух типов.

В данной работе представлены результаты исследования композитного покрытия, сформированного при плазменном напылении самофлюсующегося порошкового материала на никелевой основе ПР-НХ17СР4, состав которого представлен в таблице 1, с добавлением упрочняющей дисперсной фазы – карбида титана (TiC).

Таблица 1.
Химический состав порошка ПР-НХ17СР4

Table 1.
Chemical composition of the powder PR-NH17SR4

Массовая доля элемента, % Mass fraction of the element, %			
Никель (Ni)	Nickel	основа	base
Углерод (C)	Carbon	1,0	
Хром (Cr)	Chrome	17,0	
Кремний (Si)	Silicon	4,1	
Бор (B)	Boron	3,6	
Железо (Fe)	Iron	5,0	

Порошок ПР-НХ17СР4 для напыления обладает фракцией 45–125 мкм, высокой стойкостью к абразивному и эрозионному износу за счет высокопрочной фазы Cr_7C_3 , коррозии в пресной и морской воде, солевых растворах, нефтесодержащих средах, устойчивость против окисления на воздухе до 700–750 °С. Коэффициент трения $\mu=0,4$ при трении по стали Х12М на воздухе [13].

Карбид титана (TiC) для напыления фракцией 40–64 мкм, относится к группе сверхтвердых и тугоплавких материалов. При воздействии плазменной дуги TiC способен выдерживать резкие температурные перепады и к агрессивным среды его дальнейшей эксплуатации [14, 15].

Напыление порошковой механической смеси (ПР-НХ17СР4+ TiC) производилось на установке для плазменного напыления УПУ-3Д с плазмотроном ПНК-50 с межэлектродной вставкой. Необходимо отметить, что массовый расход напыляемого материала $m_{\text{л}}$ составило 0,3–0,5 г/с.

Из работ [13, 16] известно, что упрочнение композитного покрытия происходит за счёт введения в материал матрицы дополнительной жесткой дисперсной фазы, а также ввиду увеличения числа формируемых дислокаций (рисунок 1). Под дислокацией композитного покрытия будем понимать некоторое деформирование кристаллической решетки матрицы покрытия ввиду внедрения в неё наполнителя, который образует движение линейных дефектов. Природа данного эффекта связана с взаимным отталкиванием дислокаций, затрудняющим их движение [16].

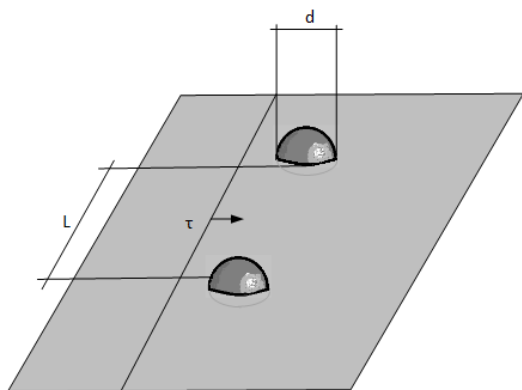


Рисунок 1. Схематичное изображение дислокаций в композитном покрытии

Figure 1. Schematic representation of dislocations in a composite coating

Как видно из рисунка 1 в плоскости матрицы, в которой равномерно распределены частицы наполнителя (дисперсные включения), дислокация должна проходить между включениями, поскольку тем самым будут создаваться дислокационные петли, которые будут образовывать поле упругих напряжений, затрудняющих проход последующих дислокаций. Расстояние между дисперсными включениями L можно вычислить при контролируемом и / или упорядоченном их расположении в слоях покрытия матрицы [17]

$$L = \frac{d\sqrt{1,91f}}{1 - \sqrt{1,91f}}, \quad (1)$$

где d – размер, частиц, мкм; f – объемная доля упрочняющей фазы в композитном материале.

Ввиду особенностей технологии плазменного напыления внутренняя макроструктура формируемого композитного покрытия будет стохастической, при этом в процессе формирования покрытия случайными становятся форма, размеры и свойства мелкодисперсной фазы, так и их локализация в основной матрице [18].

Сложность теоретического описания и прогнозирования напряжения сдвига согласно теории Фишера–Харта–Прайя, а также теории Орована, в композитных покрытиях, заключается в оценке обоюдного влияния матрицы и наполнителя, но и с изменяющимися размерами наполнителя ввиду высоких температур в процессе его напыления, а также с неоднозначностью определения величины вектора Бюргерса b . Кроме того, при формировании композитного покрытия возможно возникновения агломератов (рисунок 2, а). Чтобы этого избежать, необходимо чтобы матричный материал с включениями наполнителя подвергались спеканию и деформированию в плазменной струе практически одновременно, тогда можно будет избежать агломерации наполнителя (рисунок 1, б) [17].

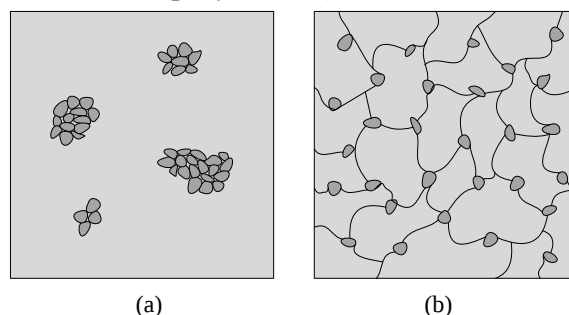


Рисунок 2. Теоретическое распределение частиц в дисперсно-упрочненном композите: (а) – агломерация наполнителя при введении в расплавленную матрицу, (б) – формируемое покрытие при спекании и деформировании дисперсно-упрочненного композита

Figure 2. Theoretical distribution of particles in a dispersed-hardened composite: (a) – agglomeration of the filler when introduced into the molten matrix, (b) – formed coating during sintering and deformation of the dispersed-hardened composite

Согласно теории Орована, напряжение сдвига τ_0 зависит от напряжения линии дислокации t , вектора Бюргерса b и расстоянием между дисперсными включениями L и их размеров d

$$\tau_0 = \frac{t}{2b} \cdot \frac{d}{L}. \quad (2)$$

Напряжение линии дислокации t выражается [3].

$$t = \frac{Gb^2}{2}, \quad (3)$$

где G – модуль сдвига матрицы, Па.

Следовательно, напряжение сдвига композитного материала τ_{K1} , учитывая напряжение в матрице покрытия без наполнителя τ , а также формулу (2) теории Орована, определяется выражением

$$\tau_{K1} = \tau_o + \tau = \tau_o + \frac{t}{2b} \cdot \frac{d}{L} = \tau_o + \frac{Gb^2}{4b} \cdot \frac{d}{L}. \quad (4)$$

Следует отметить, что с помощью формулы (4) описывает напряжение сдвига композитного материала до образования в нем дислокационных петель. При этом, как отмечено в ряде работ [17–19], напряжения сдвига композитного покрытия согласно теории Орована практически в два раза расходятся с экспериментальными величинами, полученных в лабораторных условиях.

Возникает необходимость в расчете напряжения сдвига на стадии деформирования композитного покрытия. Для данного расчета применим выражение из теории Фишера-Харта-Прайя

$$\tau_{K2} = \frac{2CGnb\sqrt{f}}{d}, \quad (5)$$

где n – количество дислокационных петель; C – некоторая константа.

Теории Орована и Фишера-Харта-Прайя описывают упрочнение достаточно приблизительно [16, 20]. В реальном композите включения, как правило, распределены неравномерно – наибольшая их плотность наблюдается вблизи границ зерен либо более крупных характерных структурных единиц в зависимости от способа получения композитного покрытия.

Результаты и обсуждение

Взяв за основу проведенные теоретические основы по упрочнению покрытия плазменного напыления дисперсной дополнительной фазой, проводились экспериментальные исследования композитного покрытия, нанесенного плазменным напылением состава – порошок ПР-НХ17СР4 фракцией 45–125 мкм – 76,5% и порошок TiC фракцией 63–80 мкм – 23,5%.

Массовая доля матрицы (порошок ПР-НХ17СР4) и наполнителя (TiC) подбиралась экспериментально согласно центральному композиционному рототабельному плану многофакторного эксперимента. Подбор состава порошка производился с учетом итогового получения композитного покрытия с наивысшей прочностью сцепления с основой.

Структура покрытия из материала 76,5% ПР-НХ17СР4+23,5% TiC, представленная на рисунке 3, состоит из никелевой основы с равномерно расположенными мелкими включениями карбида титана, которые находятся с ней в достаточно прочной связи.



Рисунок 3. Структура покрытия с дополнительной дисперсной фазой карбида титана

Figure 3. Structure of the coating with an additional dispersed phase of titanium carbide

На рисунке 4 представлен поперечный шлиф с полученным композитным нанесенным покрытием. Из рисунка 4 видна характерная слоистая структура композитного покрытия, вызванная особенностью технологии ее нанесения.

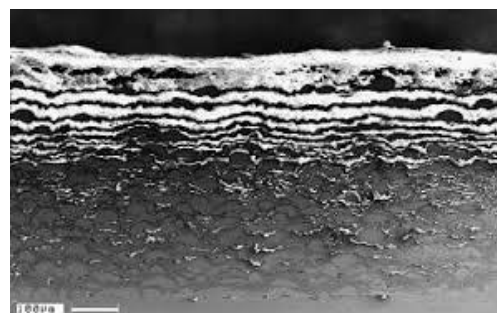


Рисунок 4. Поперечный шлиф покрытия с дополнительной дисперсной фазой карбида титана

Figure 4. Cross section of the coating with an additional dispersed phase of titanium carbide

Металлографический анализ производился согласно ГОСТ 1778–70 с использованием оптического микроскопа Axiovert 40 MAT. С целью выявления структурных составляющих композитного покрытия микрошлифы исследовались без предварительного травления. Химический состав покрытия исследовался на искровых оптико-эмиссионных спектрометрах PMI MASTER Pro и ДФС-500.

Произведем расчеты упрочнения покрытия с учетом наполнителя – карбида титана. Необходимо учесть, что оплавляемые частицы наполнителя будут разноразмерными и в процессе плазменного напыления некоторая часть напыляемого материала будет соударяться с подложкой.

Размер частиц карбида титана в нерасплавленном виде, учитывая высокую температуру в струе плазменного напыления, в среднем будет равен 25 мкм, а его объемная доля в покрытии составит 0,15.

Отсюда расстояние между дисперсными включениями будет равно

$$L = \frac{d\sqrt{1,91f}}{1 - \sqrt{1,91f}} \approx 29 \text{ мкм} \quad (6)$$

Напряжение сдвига композитного материала τ_{K1} , учитывая напряжение в матрице покрытия без наполнителя τ , а также формулу (2) теории Орована

$$\begin{aligned}\tau_{K1} &= \tau_O + \tau = \tau_O + \frac{t}{2b} \cdot \frac{d}{L} = \\ &= \tau_O + \frac{Gb^2}{4b} \cdot \frac{d}{L} = \tau_O + 0,215 \frac{Gb^2}{b}.\end{aligned}\quad (7)$$

Напряжения сдвига на стадии деформирования композитного покрытия согласно теории Фишера–Харта–Прайя

$$\tau_{K2} = \frac{2CGnb\sqrt{f}}{d} = 0,03CGnb. \quad (8)$$

Дальнейшие расчеты необходимо проводить с учетом детального анализа модуля сдвига матрицы и количества дислокационных петель, поскольку при разных технологических режимах напыления данные величины будут претерпевать значительным изменениям.

Однако, с целью подтверждения высоких значений напряжения сдвига сформированного композитного покрытия, было проведено исследование дисперсно-наполненного композита

методом сдвига согласно ГОСТ Р 56799–2015 и актуальным международным стандартам. Прочность при сдвиге составила $\tau = 380$ МПа.

Заключение

В работе проведено исследование вопроса теоретической и практической разработки нового композитного покрытия для плазменного напыления.

Исследована структура композитного покрытия из напыляемого материала: 76,5% ПР-НХ17СР4+23,5% TiC, где роль дополнительной дисперсной фазой выполняет TiC. Предварительно проведены расчеты напряжения сдвига согласно теориям Фишера–Харта–Прайя и Орована. Согласно ГОСТ Р 56799–2015 прочность при сдвиге у исследуемого покрытия составила $\tau = 380$ МПа.

Ввиду высоких значений прочности при сдвиге состав материала, используемый для получения композитного покрытия при плазменном напылении, рекомендуется использовать при восстановлении изношенных поверхностей стоек шасси воздушных судов, и приводов рулевых механизмов военной и гражданской авиации.

Литература

- 1 Иванов В.В., Балакай В.И., Щербаков И.Н., Арзуманова А.В. и др. Получение и свойства композиционного покрытия на основе никеля // Успехи современного естествознания. 2015. № 1–8. С. 1335–1338. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35395>
- 2 Кудинов В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Машиностроение, 1993. 488 с.
- 3 Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
- 4 Хасуй А. Техника напыления; пер. с японского. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.
- 5 Жачкин С.Ю. Восстановление деталей машин композитным хромовым покрытием. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2009. 171 с.
- 6 Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб: Изд-во Поли-техн. ун-та, 2013. 406 с.
- 7 Li R. I. Conditions for forming a uniform polymeric coating on the external surface of a rotating cylinder // Polymer Science Series D. 2016. V. 9. №. 1. P. 27-30.
- 8 Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Krasnova M.A. Determination of the elastic modulus of the composite dispersion-strengthened galvanic coatings // Engineering studies. 2018. V. 10. № 3(2). P. 729–737.
- 9 Sharifullin S.N., Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I. Modeling of the influence of non-stationary waves in three-component medium in the formation of a plasma jet // Journal of Physics: Conf. Series. 2019. V. 1328. P. 012098. doi: 10.1088/1742-6596/1328/1/012098
- 10 Логинов П.К., Ретюнский О.Ю. Способы и технологические процессы восстановления изношенных деталей. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 217 с.
- 11 Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Корнеев В.М. и др. Технологические процессы в техническом сервисе машин и оборудования. М.: ИНФРА-М, 2017. 346 с.
- 12 Ловшенко Ф.Г., Ловшенко Г.Ф., Федосенко А.С. Формирование фазового состава, структуры и свойств механически легированных композиционных порошков на основе системы «железо-алюминий» и покрытий из них // Вестник Белорусско-Российского университета. 2012. №. 1. С. 36-50.
- 13 Радченко М.В., Шевцов Ю.О., Радченко В.Г., Уварова С.Г. Разработка технологических рекомендаций по созданию защитных покрытий на трубах котлов с «кипящим слоем» газопорошковой наплавкой. Ползуновский вестник. 2009. № 4. С. 200–206.
- 14 Cai B., Tan Y.-f., He L., et al. Tribological properties of TiC particles reinforced Ni-based alloy composite coatings // Transactions of Non-ferrous Metals Society of China. 2013. V. 13. P. 1681–1688.
- 15 Кипарисов С.С., Левинский Ю.В., Петров А.П. Карбид титана: получение, свойства, применение. Производственное издание М.: Металлургия, 1987. 216 с.
- 16 Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них. М.: УП «Технопринт», 2001. 300 с.

- 17 Аннин Б.Д., Карпов Е.В. Механика композитов. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2021. 85 с.
- 18 Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Егорова Г.Н., Белых А.И. Исследование критериев качества двухфазных композитных покрытий на основе железа, формируемых методом плазменного напыления // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 4. С. 261–268. doi: 10.20914/2310-1202-2021-4-261-268.
- 19 Новые материалы. Коллектив авторов. Под научной редакцией Ю.С. Карабасова. М.: «МИСИС», 2002. 736 с.
- 20 Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.

References

- 1 Ivanov V.V., Balakay V.I., Shcherbakov I.N., Arzumanova A.V. Obtaining and properties of a composite coating based on nickel. Successes of modern natural sciences. 2015. no. 1–8. pp. 1335–1338. Available at: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35395> (in Russian).
- 2 Kudinov V.V. Spray coating. Theory, technology and equipment. Moscow, Mashinostroenie, 1993. 488 p. (in Russian).
- 3 Barvinok V.A. Stress state control and properties of plasma coatings. Moscow, Mashinostroenie, 1990. 384 p. (in Russian).
- 4 Hasui A. Spraying technique; per. from Japanese. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 288 p. (in Russian).
- 5 Zhachkin S.Yu. Restoration of machine parts with composite chrome coating. Voronezh, Voronezh State Technical University, 2009. 171 p. (in Russian).
- 6 Sosnin N.A., Ermakov S.A., Topolyansky P.A. Plasma technologies. Guide for engineers. St. Petersburg, Publishing House of Poli-tekh. un-ta, 2013. 406 p. (in Russian).
- 7 Li R. I. Conditions for forming a uniform polymeric coating on the external surface of a rotating cylinder. Polymer Science Series D. 2016. vol. 9. no. 1. pp. 27–30.
- 8 Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Krasnova M.A. Determination of the elastic modulus of the composite dispersion-strengthened galvanic coatings. Engineering studies. 2018. vol. 10. no. 3(2). pp. 729–737.
- 9 Sharifullin S.N., Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I. Modeling of the influence of non-stationary waves in three-component medium in the formation of a plasma jet. Journal of Physics: Conf. Series. 2019. vol. 1328. pp. 012098. doi: 10.1088/1742-6596/1328/1/012098
- 10 Loginov P.K., Retyunsky O.Yu. Methods and technological processes for the restoration of worn parts. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2010. 217 p. (in Russian).
- 11 Kravchenko I.N., Puzryakov A.F., Korneev V.M. Technological processes in the technical service of machines and equipment. Moscow, INFRA M, 2017. 346 p. (in Russian).
- 12 Lovshenko F.G., Lovshenko G.F., Fedosenko A.S. Formation of the phase composition, structure and properties of mechanically alloyed composite powders based on the "iron-aluminum" system and coatings from them. Bulletin of the Belarusian-Russian University. 2012. no. 1. pp. 36–50. (in Russian).
- 13 Radchenko M.V., Shevtsov Yu.O., Radchenko V.G., Uvarova S.G. Development of technological recommendations for the creation of protective coatings on the pipes of boilers with "fluidized bed" gas-powder surfacing. Polzunovskiy Bulletin. 2009. no. 4. pp. 200–206. (in Russian).
- 14 Cai B., Tan Y.-f., He L., et al. Tribological properties of TiC particles reinforced Ni-based alloy composite coatings. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China. 2013. vol. 13. pp. 1681–1688.
- 15 Kiparisov S.S., Levinsky Yu.V., Petrov A.P. Titanium carbide: obtaining, properties, application. Production edition Moscow, Metallurgiya, 1987. 216 p. (in Russian).
- 16 Panteleenko F.I. Self-fluxing diffusion-alloyed iron-based powders and protective coatings from them. Moscow, UE "Technoprint", 2001. 300 p. (in Russian).
- 17 Annin B.D., Karpov E.V. Mechanics of composites. Novosibirsk, RIC NSU, 2021. 85 p. (in Russian).
- 18 Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I., Egorova G.N., Belykh A.I. Investigation of quality criteria for two-phase composite coatings based on iron, formed by plasma spraying. Proceedings of VSUET. 2021. vol. 83. no. 4. pp. 261–268. doi: 10.20914/2310-1202-2021-4-261-268. (in Russian).
- 19 New materials. The team of authors. Under the scientific editorship of Yu.S. Karabasova. Moscow, "MISIS", 2002. 736 p. (in Russian).
- 20 Tabakov V.P. Formation of wear-resistant ion-plasma coatings of cutting tools. Moscow, Mashinostroenie, 2008. 311 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Григорий И. Трифонов к.т.н., старший научный сотрудник, НИЦ (ППО и УА ВВС), Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, 54А, г. Воронеж, 394064, Россия, trifonov_gi@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-7739-5587>

Никита А. Пенков д.т.н., НИЦ (О и ИТ), Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, 54А, г. Воронеж, 394064, Россия, grishakip@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-4644-3814>

Information about authors

Gregory I. Trifonov Cand. Sci. (Engin.), senior researcher, research center, The Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, 54A Starye Bolshevikov str. Voronezh, 394064, Russia, trifonov_gi@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-7739-5587>

Nikita A. Penkov Dr. Sci. (Engin.), research center, The Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, 54A Starye Bolshevikov str. Voronezh, 394064, Russia, grishakip@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-4644-3814>

Анна А. Дерканосова д.т.н., профессор, кафедра сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, aa-derk@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9726-9262>

Марина Н. Краснова к.т.н., доцент, кафедра автоматизированного оборудования машиностроительного производства, Воронежский государственный технический университет, Московский просп., 14, г. Воронеж, 394000, krasnovam27@mail.ru

Anna A. Derkanosova Dr. Sci. (Engin.), professor, service and restaurant business department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, aa-derk@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9726-9262>

Marina N. Krasnova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, automated equipment of machine-building production department, Voronezh State Technical University, Moskovsky Ave., 14, Voronezh, 394000, Russia, krasnovam27@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/07/2022	После редакции 02/08/2022	Принята в печать 25/08/2022
Received 11/07/2022	Accepted in revised 02/08/2022	Accepted 25/08/2022