



Received: 03.08.2022
Revised: 07.09.2022
Accepted: 30.09.2022
DOI: 10.17804/2410-9908.2022.5.023-039

STUDYING THE ADHESION STRENGTH OF PLASMA POWDER METAL COATINGS ON THE SURFACE OF GRAPHITE

Yu. V. Nikolin^{1, a)}, D. I. Vichuzhanin^{1, b)*}, N. B. Pugacheva^{1, c)}, F. I. Mezin^{2, d)}

¹*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation*

²*Directorate for Technical Development and Quality, Severstal PJSC,
30 Mira St., Cherepovets, 162608, Russian Federation*

- a)  <http://orcid.org/0000-0003-1070-2076>  sf.ekb@mail.ru;
b)  <http://orcid.org/0000-0002-6508-6859>  mmm@imach.uran.ru;
c)  <http://orcid.org/0000-0001-8015-8120>  nat@imach.uran.ru
d)  fimezin@severstal.com

*Corresponding author. E-mail: mmm@imach.uran.ru

Address for correspondence: 34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation
Tel.: +7 (343) 362 30 27; fax: +7 (343) 374 53 30

Coatings applied onto the surface of specimens made of UHP electrode graphite are studied. Coatings are applied by thermal spraying in two stages: spraying of a sublayer (layer I) of the powder materials being tested; spraying of the main layer of the plasma coating, consisting of a mechanical mixture of fine spherical aluminum (Al) and copper (CuCr1) powders in an equal volume ratio. The adhesion strength between the coating and the graphite surface is studied as dependent on the following factors: sublayer thickness; the type of preliminary surface preparation; the chemical composition of the powder material of the sublayer. It has been found that the highest adhesion strength between the coating and the graphite base is achieved when the sublayer thickness is 80 μm , when a thread with a depth of 1.0 mm is cut on the base surface, and when Al powder is used as a sublayer.

Keywords: plasma powder coating, adhesion strength, graphitized material.

Acknowledgment

The work was performed under state assignment no. AAAA-A18-118020790145-0. The tests were performed with the equipment installed at the Plastometriya shared research facilities affiliated to the Institute of Engineering Science, UB RAS.

References

1. Rykalin N.N., Kulagin M.X., Shorshorov O.A. et al. In: *Plazmennyye protsessy v metallurgii i tekhnologii neorganicheskikh materialov* [Plasma Processes in Metallurgy and Technology of Inorganic Materials]. Moscow, Nauka Publ., 1973. (In Russian).
2. Budinovsky S.A., Muboyadzhyan S.A., Gayamov A.M., Matveev P.V. Development of Ion-Plasma Refractory Metallic Layers of Heat-Insulating Coatings for Cooled Turbine Rotor Blades. *Metal Science and Heat Treatment*, 2014, vol. 55, pp. 652–657. DOI: 10.1007/s11041-014-9684-2.
3. Tarasenko Yu.P., Tsareva N.N., Berdnik O.B. The structure and physical-mechanical properties of the heat-resistant Ni-Co-Cr-Al-Y intermetallic coating obtained using rebuilt plasma equipment. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 1, No. 5, pp. 641–650. DOI: 10.1134/S0869864314050138.

4. Guzanov B.N., Kositsyn S.V., Pugacheva N.B. *Uprochnyayushchie zashchitnye pokrytiya v mashinostroenii* [Reinforcing Protective Coatings in Mechanical Engineering]. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2004, 244 p. ISBN: 5-7691-1405-3. (In Russian).
5. Shevchenko O.I., Trekin G.E. & Farber V.M. Distribution of chemical elements in structural components of a facing of a self-fluxing nickel alloy. *Met Sci Heat Treat*, 1997, 39, pp. 233–235. DOI: 10.1007/BF02467225.
6. Otsubo F., Era, H., Kishitake K. Structure and phases in nickel-base selffluxing alloy coating containing high chromium and boron. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2000, vol. 9, iss. 1, pp. 107–113. DOI: 10.1361/105996300770350131.
7. Kulik A.Ya., Borisov Yu.S., Mnukhin A.S., and Nikitin M.D. *Gazotermicheskoe napylenie kompozitsionnykh poroshkov* [Gas-Thermal Deposition of Composite Powders]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1985. (In Russian).
8. Uusitalo Mikko, Vuoristo Petri, Mäntylä Tapio. Elevated temperature erosion-corrosion of thermal sprayed coatings in chlorine containing environments. *Wear*, 2002, vol. 252, iss. 7–8, pp. 586–594. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00014-5.
9. Matthews S., Schweizer M. Optimization of arcsprayed Ni-Cr-Ti coatings for high temperature corrosion applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2013, vol. 22, iss. 4, pp. 538–550. DOI: 10.1007/s11666-013-9914-y.
10. Guzanov B.N., Pugacheva N.B., Bykova T.M. Corrosion and erosion resistance of the combined multilayer coating for the protection of critical parts of modern gas turbine engines. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2021, iss. 2, pp. 6–21. DOI: 10.17804/2410-9908.2021.2.006-021. Available at: https://dream-journal.org/issues/2021-2/2021-2_317.html
11. Sivakumar R., Mordike B.L. High temperature coatings for gas turbine blades: a review. *Surface and Coatings Technology*, 1989, vol. 37, iss. 2, pp. 139–160. DOI: 10.1016/0257-8972(89)90099-6.
12. Mrdak M.R. Mechanical properties and metallographic analysis of plasma spray ABS – Ni5.5wt.%Al5wt.%Mo coatings. *Vojnotehnički glasnik*, 2019, vol. 67, iss. 3, pp. 573–587. DOI: 10.5937/vojtehg67-17424.
13. Pugacheva N.B. Current trends in the development of heat-resistant coatings based on iron, nickel and cobalt aluminides. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2015, iss. 3, pp. 51–82. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.051-082. Available at: https://dream-journal.org/issues/2015-3/2015-3_30.html
14. Guzanov B.N., Obabkov N.V., Migacheva G.N. Development and research of multi-layer composite coatings high temperature. *Sciences of Europe*, 2017, No. 16 (16), pp. 261–265.
15. Sidhu S.S., Prakash S. Performance of NiCrAlY, Ni–Cr, Stellite-6 and Ni₃Al coatings in Na₂SO₄–60% V₂O₅ environment at 900° under cyclic conditions. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 201, iss. 3–4, pp. 1643–1654. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.02.035.
16. Pugacheva N.B., Guzanov B.N., Obabkov N.V., Bykova T.M., Michurov N.S. Studying the structure and adhesion strength of thermal barriers coating. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2176, pp. 030013-1–030013-4. DOI: 10.1063/1.5135137.
17. Guzanov B.N., Pugacheva N.B., Alekseev V.D., Slukin Y.Yu. Features of creating combined heat-resistant multicomponent coatings for high-temperature. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, No. 3, pp. 12–19. DOI: 10.155593/2224-9877/2020.3.02. (In Russian).
18. Fialkov A.S. *Formirovanie struktury i svoistv uglegrafitovykh materialov* [Formation of the Structure and Properties of Carbon-Graphite Materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1965. (In Russian).

19. Kretschmar Eberhard, Schwarz Herrmann. *Napylenie metallov, keramiki i plastmass* [Spray Deposition of Metals, Ceramics, and Plastics, transl. Germ.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. (In Russian).
20. Korobov Yu. S., Panov V. I., Razikov N. M. In: *Osnovnye metody i materialy gazotermicheskogo napyleniya* [Basic methods and materials of thermal spraying]. Ekaterinburg, Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2016, 77 p. (In Russian).
21. Fialkov A.S., Varlakov V.P., Smirnova T.Yu. Microstructure of petroleum and pitch cokes. *Himiya Tverdogo Topliva*, 1994, No. 2, pp. 49–53. (In Russian).
22. Ubbelohde A.R., Lewis F.A. *Graphite and its crystal compounds*. New York, Oxford University Press, 1960, 217 p.
23. Dorozhkin N.N. *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu adgezionnoy prochnosti pokrytiy* [Guidelines for determining the adhesive strength of coatings]. Minsk, INDmash Publ., 1985, 54 p. (In Russian).
24. Ryzhov E.V., Suslov A.G., and Fedorov V.P. *Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh svoystv detalei mashin* [Technologies Ensuring the Required Operational Properties of Machine Parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 176 p. (In Russian).
25. Rodichev A.Yu. Study of adhesion strength of journal coatings of rotor-bearing nodes of a test rig. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2018, vol. 9, pp. 269–276. (In Russian).
26. Pustyl'nik E. I. *Statisticheskie metody analiza i obrabotki nablyudenij* [Statistical Methods of Analysis and Processing of Observations]. Moscow, Nauka Publ., 1968. (In Russian).
27. Stepnov M.N. and Shavrin A.V. *Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy: spravochnik* [Handbook of Statistical Methods of Processing the Results of Mechanical Tests]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. (In Russian).

Подана в журнал: 03.08.2022

УДК 621.793.71

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.5.023-039

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ГРАФИТА

Ю. В. Николин^{1, а)}, Д. И. Вичужанин^{1, б)*}, Н. Б. Пугачева^{1, в)}, Ф. И. Мезин^{2, г)}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация

²ДТРК ПАО Северсталь, д. 30, ул. Мира, г. Череповец, 162608, Российская Федерация

- а)  <http://orcid.org/0000-0003-1070-2076>  sf.ekb@mail.ru;
б)  <http://orcid.org/0000-0002-6508-6859>  mmm@imach.uran.ru;
в)  <http://orcid.org/0000-0001-8015-8120>  nat@imach.uran.ru;
г)  fimezin@severstal.com

*Ответственный автор. Эл. почта: mmm@imach.uran.ru

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, Российская Федерация

Тел.: +7 (343) 362–30–27; факс: +7 (343) 374–53–30

В работе исследованы покрытия, нанесенные на поверхности образцов из электродного графита марки ЭГСП. Нанесение покрытий осуществляли методом газотермического напыления в два этапа: нанесение подслоя (1-го слоя) из испытуемых порошковых материалов; нанесение основного массива плазменного покрытия, состоящего из механической смеси порошков алюминия (АСД-0) и меди (БрХ1) в равнообъемной пропорции. Исследовали прочность сцепления покрытий с поверхностью графита в зависимости от следующих факторов: влияния толщины подслоя; влияния вида предварительной подготовки поверхности; влияния химического состава порошкового материала подслоя. Установлено, что наибольшая прочность сцепления покрытия с графитовой основой достигается при толщине подслоя 80 мкм; при нарезке на поверхности основы резьбы глубиной 1,0 мм; а также при использовании в качестве подслоя алюминиевого порошка АСД-0.

Ключевые слова: плазменно-порошковое покрытие, прочность сцепления, графитированный материал.

1. Введение

Графит является чрезвычайно востребованным в различных отраслях промышленности материалом. Без его применения невозможно представить современную металлургию, машиностроение, атомную, электротехническую и химическую промышленности [1–3]. Прежде всего графит используется для изготовления электродов, поскольку хорошо проводит электрический ток в различных средах (водном растворе, расплаве солей и металлов). Угольные электроды применяются при выплавке алюминия и магния, при этом они эксплуатируются в весьма жестких условиях (при высокой температуре, в агрессивной среде в виде расплавленных солей и т. д.), поэтому они должны удовлетворять следующим основным требованиям: 1) выдерживать высокие температуры; 2) иметь достаточную электропроводность; 3) иметь возможно меньшую пористость и достаточную механическую прочность; 4) обладать хорошей стойкостью против окисления воздухом и разъедания различными химическими веществами; 5) быть достаточно экономичными. Решить вопрос повышения долговечности графитовых электродов возможно за счет нанесения на их поверхность покрытий различного целевого назначения. Известно большое количество способов нанесения покры-

тий: технологии электролитического осаждения покрытий; технологии пропитки, обмазки и окраски; технологии газотермического напыления и др. [4–7].

Из всего многообразия методов нанесения защитных покрытий в случае графитовых электродов наиболее перспективным представляется плазменно-порошковое напыление (ППН) как частный вид газотермических методов нанесения покрытий. Несомненным преимуществом этого метода является высокий уровень универсальности используемых материалов (металлических, керамических, полимерных), высокая степень теплового воздействия на диспергированные материалы, доступность оборудования и порошковых материалов для напыления [8–15].

Существует широкий спектр материалов покрытий, применяемых для защиты поверхности графитовых электродов [16–17]. Основной и наиболее часто решаемой задачей при нанесении покрытий на графитированные материалы является повышение стойкости к высокотемпературному окислению.

Одной из проблем применения технологий ППН для нанесения покрытий на поверхность графита является обеспечение необходимой прочности сцепления покрытия с графитовой основой. Адгезионная прочность напыляемых покрытий является актуальной задачей разработки надежных систем защиты и для металлических материалов [12–18]. Тем более остро она стоит для неметаллических, в том числе графитосодержащих материалов. Статистические данные показывают [19], что 97 % покрытий, выполненных различными видами газотермического напыления, наносятся на металлическую основу и лишь небольшая доля покрытий – на неметаллические материалы, включая графит. Отсутствие надежных и достоверных данных о свойствах ППН-покрытий, нанесенных на графит или графитосодержащие материалы, требует выполнения дополнительных исследований.

Цель работы – исследовать прочность сцепления плазменно-порошковых покрытий, нанесенных на поверхность графита, в зависимости от вида предварительной подготовки его поверхности и состава напыляемых порошковых материалов.

2. Материалы и методы исследования

2.1. Материалы образцов

Таблица 1

Порошковые материалы для плазменного напыления

№ п.п.	Марка порошка/элементный состав	ГОСТ, ТУ	Размер частиц, мкм
1	БрХ1/Cu-Cr	ГОСТ 18175-78	40–100
2	ПГ-Ю5Н/Ni-Al	ТУ 14-22-76-95	40–100
3	ПР-Н55Т45/Ni-Ti	ТУ 14-22-76-95	40–100
4	ПР-НД42СР/Ni-Cu-Si-B	ТУ 14-22-76-95	40–100
5	ПМ-М/молибден	ТУ 14-22-160-2002	40–80
6	ПР-НХ15СР2/Ni-Cr-Si-B	ГОСТ 28377-89	40–100
7	АСД-0/алюминий	ТУ 1791-007-49421776-2011	40–125
8	ПХ20Н80/Ni-Cr	ГОСТ 13084-88	40–100
9	ПВ-НХ16Ю6Ит/Ni-Cr-Al-Y	ТУ 14-22-34-90	40–100

Материал образцов – электродный графит марки ЭГСП (зарубежный аналог UHP – Ultra High Power). На поверхность графитовых образцов наносили покрытия методом газотермического напыления. В качестве порошковых материалов для плазменного напыления был выбран ряд составов (табл. 1), которые традиционно применяются в технологии газотермического нанесения покрытий [4–6, 8, 20]. Известно [4–8], что при газотермическом напылении важнейшими факторами обеспечения высокой прочности сцепления наносимых покрытий с основой являются, во-первых, предварительная подготовка поверхности детали, так как состояние поверхности определяет качество адгезионной связи на границе раздела покрытие–основа, во-вторых, выбор материала подслоя (1-го слоя) покрытия [14, 16–17].

2.2. Предварительная подготовка поверхности образцов из графита

Основными операциями предварительной подготовки поверхности являются очистка поверхности и различные виды обработки, связанные с профилированием напыляемой поверхности (струйно-абразивная, механическая и др.). Особое значение предварительная подготовка поверхности имеет в случае, когда объектом для напыления покрытия является графит или графитированный материал (графит искусственного происхождения), это связано с особенностями его структуры. Так, искусственные графитированные материалы представляют собой разновидность композиционных материалов, характеризующихся неоднородной крупнозернистой структурой с большим количеством пор и дефектов технологического происхождения [18, 21, 22]. Температура плавления графита 3850 °С, поэтому образование адгезионных связей металлического покрытия с графитовой основой, вероятно, будет происходить по принципу механического зацепления частиц покрытия за неровности основы без образования так называемых металлургических связей, возникающих при взаимном подплавлении материала покрытия и основы. По этой причине для исследуемых покрытий нельзя ожидать высоких значений прочности сцепления 40–55 МПа, которые характерны для плазменно-порошкового напыления вида *металл на металл*. В связи с этим, создание развитой контактной поверхности путем ее предварительной обработки является ключевым технологическим аспектом достижения конструкционной прочности сцепления покрытия с поверхностью графита.

С учетом возможного масштабирования технологии плазменного напыления защитных покрытий на графит, принимая во внимание производительность и экономичность способов предварительной обработки поверхности перед напылением, были рассмотрены следующие возможные варианты подготовки поверхности:

- струйно-абразивная обработка;
- механическая обработка.

Струйно-абразивная обработка поверхности графитовых образцов выполнялась с использованием абразивных частиц электрокорунда, с размерностью частиц – F60, давлением воздуха – 4,5...5,5 атм. На рис. 1 представлены образцы графита до и после струйно-абразивной обработки.

В результате такой обработки происходит интенсивное эрозионное разрушение его приповерхностных областей, что можно объяснить недостаточной когезионной прочностью графитированного материала и его низкой твердостью. При этом вскрываются дефектные участки структуры графита и на поверхности обнаруживаются поры и каверны размером до нескольких миллиметров. Невозможность получения контролируемых параметров шероховатости поверхности графита при проведении такого вида обработки стало причиной нецелесообразности его дальнейшего использования.

Механическая обработка поверхности графитовых образцов выполнялась следующим образом (рис. 2):

- 1) токарно-лезвийная обработка при изготовлении образцов в размер с чистой проходкой боковой поверхности;

- 2) крацевание – механическая обработка при помощи латунной или стальной щетки;
3) нарезка резьбы на токарном станке с глубиной реза 0,25 мм/ 0,50 мм/ 1,00 мм и шагом резьбы 1,5 мм.

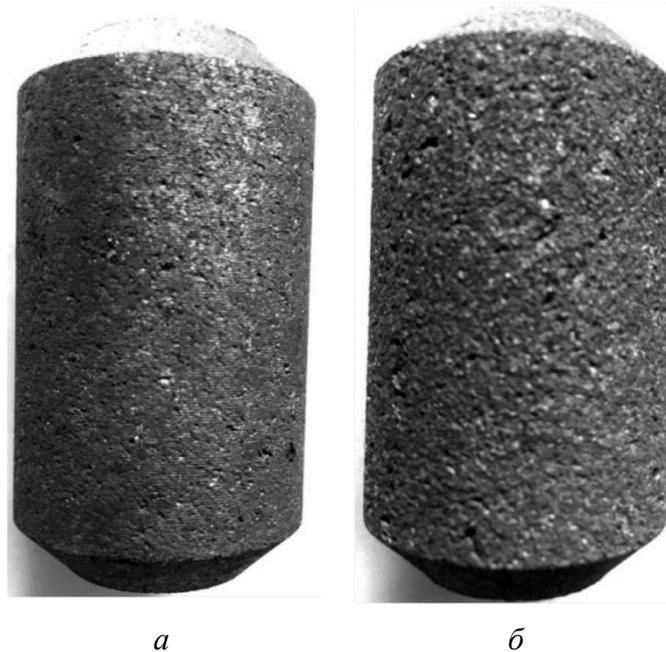


Рис. 1. Образцы графита: *a* – исходное состояние; *б* – после струйно-абразивной обработки



Рис. 2. Поверхность образцов графита после механической обработки: 1 – токарно-лезвийная обработка; 2 – крацевание; 3, 4, 5 – нарезка резьбы глубиной 0,25/ 0,5/ 1,0 мм соответственно

Производительность технологии токарно-механической обработки, ее традиционность и доступность, возможность получения заданных параметров шероховатости обрабатываемой поверхности позволяет рассматривать этот вид предварительной обработки поверхности графита в качестве основного.

2.3. Выбор материала подслоя

Наряду с предварительной подготовкой напыляемой поверхности определяющее значение имеет выбор подслоя (1-го слоя) покрытия. Подслой выполняет роль промежуточной зоны между основными слоями покрытия (в случае нанесения многослойных покрытий) и поверхностью детали, тем самым фактически задает уровень прочностных параметров адгезионной связи покрытия с подложкой. При выборе материала подслоя во внимание принимались опыт использования различных порошковых материалов в технологии ППН, устойчивость и повторяемость результатов при напылении покрытий, доступность порошковых материалов и их стоимость. Результатом выбора, основанного на критериях отбора, стали порошковые материалы, представленные в табл. 1.

2.4. Плазменное напыление

Напыление ППН-покрытий выполнялось на установке плазменно-порошкового напыления УПН-60КМ ТСП2017, изготовитель ООО «НПП «ТСП» (г. Екатеринбург). Все образцы напылялись при одинаковом режиме работы установки: ток – 310 А, напряжение – 57...60 В. Основной плазмообразующий газ – аргон; высокоэнтальпийный газ – водород.

Нанесение плазменно-порошкового покрытия на графитовые образцы выполняли по следующей схеме:

- нанесение подслоя (1-го слоя) из испытуемых порошковых материалов толщиной не более 150 мкм;
- нанесение основного массива плазменного покрытия, состоящего из механической смеси порошков алюминия (АСД-0) и меди (БрХ1) в равнообъемной пропорции.

Плазменное напыление выполняли на заготовках из графита диаметром 40 мм и длиной 150 мм. Предварительно на графитовые заготовки устанавливали оснастку трафаретного типа из разрезных стальных полуколец, которая защищала часть заготовки от напыления (рис. 3). Принимали, что каждая такая заготовка формирует группу, состоящую из подобных образцов с покрытиями одинакового химического состава и одной толщиной нанесенных слоев. Плазменно-порошковое покрытие выполнялось в виде кольца заданной ширины – около 14 мм и толщиной покрытия около 0,7...0,8 мм. После напыления заготовку разрезали в местах, свободных от покрытия, в результате получали образцы для испытаний на прочность сцепления ППН-покрытий с графитовой основой (рис. 4).



Рис. 3. Заготовки перед напылением порошковых материалов

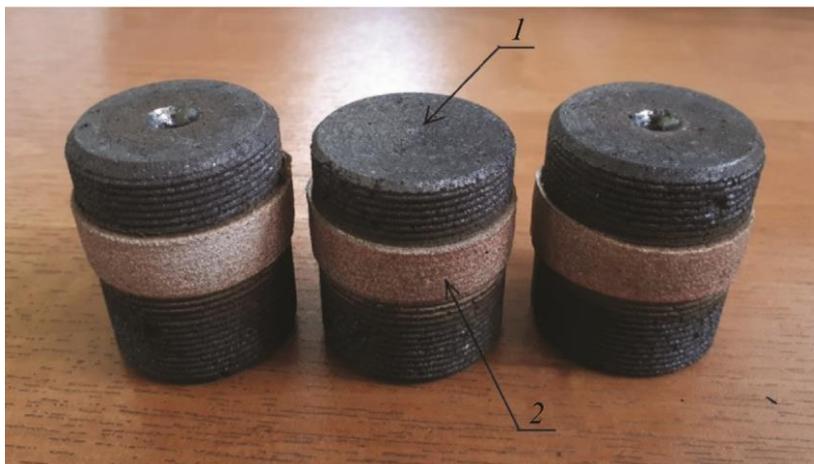


Рис. 4. Образцы для определения прочности сцепления покрытий: 1 – графитированный материал; 2 – плазменно-порошковое покрытие

Всего было изготовлено три партии образцов, которые позволили выявить влияние следующих факторов на прочность сцепления плазменно-порошковых покрытий:

- 1) влияние толщины подслоя;
- 2) влияние вида предварительной подготовки поверхности;
- 3) влияние химического состава порошкового материала подслоя.

Для исследования влияния толщины подслоя были изготовлены образцы, в которых в качестве подслоя использовали никель-алюминиевый (ПГ-Ю5Н) и хромоникелевый (ПР-Х20Н80) порошковые материалы. Способ предварительной подготовки поверхности для образцов этой партии был одинаковым – крацевание. Для выяснения зависимости прочности сцепления покрытия от толщины нанесенного подслоя были нанесены покрытия с различной толщиной подслоя (табл. 2).

Таблица 2

Образцы для испытаний прочности сцепления в зависимости от материала и толщины подслоя

№ группы	Марка порошка/ элементный состав	Толщина подслоя, мкм
1	ПГ-Ю5Н / Ni-Al	80
2	ПГ-Ю5Н / Ni-Al	120
3	ПГ-Ю5Н / Ni-Al	150
4	ПХ20Н80/ Ni-Cr	80
5	ПХ20Н80/ Ni-Cr	120
6	ПХ20Н80/ Ni-Cr	150

Для исследования влияния вида предварительной подготовки поверхности использовали графитовые заготовки с поверхностью, обработанной различным образом (табл. 3). Покрытия этих партий образцов имели одинаковый состав: подслоя – ПГ-Ю5Н (толщина 80 мкм) и основной слой – механическая смесь АСД-0 + БрХ1 (50/50) толщиной слоя 600...700 мкм.

Испытания образцов проводились на сервогидравлической испытательной установке INSTRON 8801.

Характеристики установки:

– максимальное усилие 100 кН; погрешность датчика измерения усилия не более 0,25 % от показаний датчика; датчик силы калибруется автоматически;

– ход исполнительного органа 100 мм; точность измерения перемещения не более 0,5 % от хода исполнительного органа; скорость движения исполнительного органа установки можно менять в диапазоне 1мм/мин – 150 мм/сек;

– максимальная частота записи показаний датчиков во время эксперимента 5 кГц.

Испытательная установка снабжена ЭВМ и контроллером FastTrack. Все операции в процессе эксперимента выполняются программно-аппаратными средствами.

Таблица 3

Образцы для испытаний прочности сцепления в зависимости от вида предварительной обработки

№ группы	Вид обработки поверхности графита
1	Крацевание
2	Резьба глубиной 0,25 мм
3	Резьба глубиной 0,50 мм
4	Резьба глубиной 1,00 мм

2.5. Испытания на прочность сцепления

Для определения прочности сцепления покрытия применяли известную методику, описанную в работах [23, 24], согласно которой образец устанавливали в матрицу 1 (рис. 5), при этом покрытие опиралось на торцевую поверхность матрицы. Затем матрицу с образцом устанавливали на нижний боек испытательной установки 2 и выполняли испытание на сжатие. Скорость движения исполнительного органа установки в испытаниях составила 1 мм/мин. Испытания проводили до момента разрушения покрытия.



Рис. 5. Сервогидравлическая испытательная установка INSTRON 8801, образец в бойках испытательной установки: 1 – матрица; 2 – боек

Прочность сцепления при сдвиге оценивается напряжением сдвига [25]:

$$\sigma_{\bar{n}\bar{o}} = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi \cdot b \cdot d}, \quad (1)$$

где F – сила сдвига при разрушении покрытия, Н; S – площадь контакта покрытия с основой, мм²; d, b – соответственно диаметр образца и ширина покрытия, мм.

По результатам испытаний выполнен статистический анализ данных, в рамках которого рассчитаны [26, 27]:

– среднее выборочное значение прочности сцепления при сдвиге

$$\bar{\sigma}_{\bar{n}\bar{o}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_{\bar{n}\bar{o}_i}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\bar{n}\bar{o}_i}$ – выборочные значения прочности сцепления при сдвиге; N – объем выборки;

– стандартное отклонение

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\sigma_{\bar{n}\bar{o}_i} - \bar{\sigma}_{\bar{n}\bar{o}})^2}, \quad (3)$$

известно, что 68,26 % значений выборки лежат в диапазоне $\pm S$ от среднего выборочного;

– доверительный интервал для уровня значимости $\alpha = 0,05$:

$$\Delta x = \frac{t_{\alpha, N} \cdot S}{\sqrt{N}}, \quad (4)$$

где $t_{\alpha, N}$ – коэффициент Стьюдента.

3. Результаты исследования

На рис. 6 представлены результаты исследования прочности сцепления покрытия с основой из графитированного материала в зависимости от толщины подслоя. Практика применения технологии плазменно-порошкового напыления [25] показывает, что оптимальная толщина подслоя должна находиться в пределах 60–100 мкм. Это хорошо согласуется с полученными результатами. Рост адгезионной прочности у покрытий с толщиной подслоя 80 мкм в сравнении с покрытиями с толщиной подслоя в 150 мкм составил 47 % для никель-алюминиевого (ПГ-Ю5Н) и 20 % для хромоникелевого (ПР-Х20Н80) порошковых материалов.

На рис. 7 представлены результаты исследования прочности сцепления покрытия с основой из графитированного материала в зависимости от вида предварительной подготовки напыляемой поверхности.

Результаты испытаний подтверждают предположение о том, что в отсутствие возникновения металлургической связи между металлическими покрытиями и графитовой основой прочность их сцепления будет формироваться за счет сил механического зацепления и определяться степенью развитости поверхности графита. Экспериментально установлен почти 40 %-й рост значений прочности сцепления покрытия к графитовой основе при сравнении легкой (крацевание) и существенной (резьба глубиной 1,0 мм) степени изменения профиля поверхности.

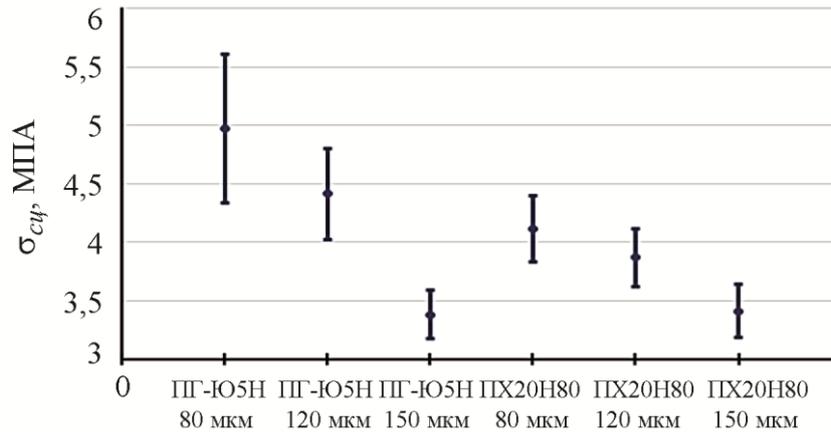


Рис. 6. Влияние толщины подслоя плазменно-порошкового покрытия на прочность сцепления покрытия с основой

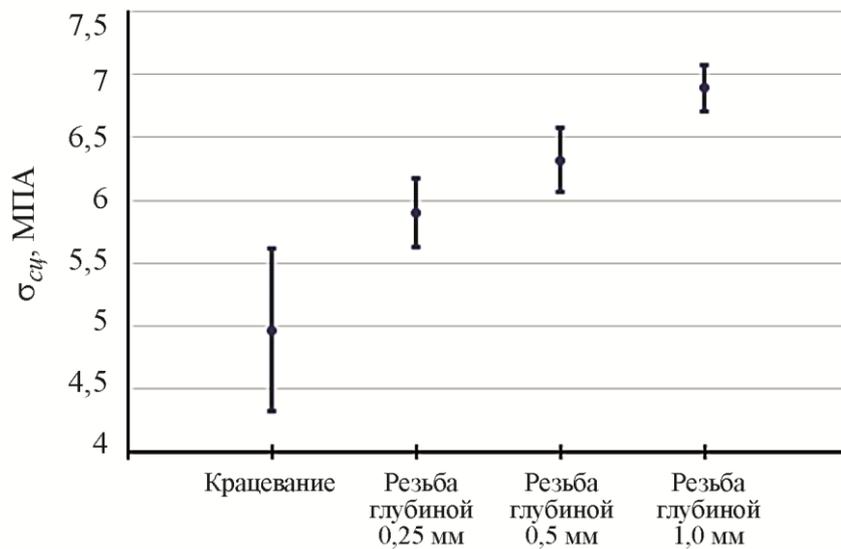


Рис. 7. Влияние вида предварительной подготовки поверхности на прочность сцепления покрытия с основой

На рис. 8 приведены результаты исследования прочности сцепления покрытия с основой из графитированного материала в зависимости от химического состава порошкового материала подслоя.

Наилучшие параметры прочности сцепления в исследованной группе порошковых материалов достигаются для алюминиевого порошка АСД-0. Этот факт можно объяснить почти полным проплавлением частиц порошка алюминия при напылении, что позволяет им хорошо заполнять профиль поверхности графита. При этом реализуется механизм анкерного зацепления и достигаются высокие показатели сцепления покрытия с графитовой основой, которые в 2 раза выше, чем у материала с наименьшим значением прочности сцепления (порошок на основе никеля и титана ПР-Н55Т45).

Важно отметить, что некоторое количество исследованных образцов с ППН-покрытиями показало существенный разброс значений стандартного отклонения измеренных величин. При анализе внешнего вида испытываемых образцов было установлено, что характер их разрушения в ходе испытаний можно отнести к трем характерным типам:

Тун 1. Разрушение покрытия по адгезионному типу (рис. 9). В этом случае плоскость сдвига совпадает с плоскостью раздела графита и ППН-покрытия. Характерная диаграмма нагружения для этого типа разрушения представлена на рис. 10.

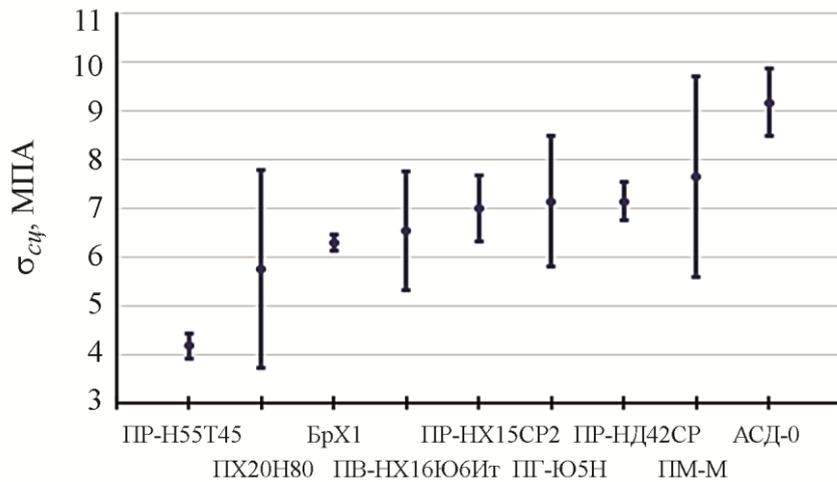


Рис. 8. Влияние химического состава порошкового материала подслоя на прочность сцепления покрытия с основой



Рис. 9. Фотография образца с покрытием, разрушенным по адгезионному типу

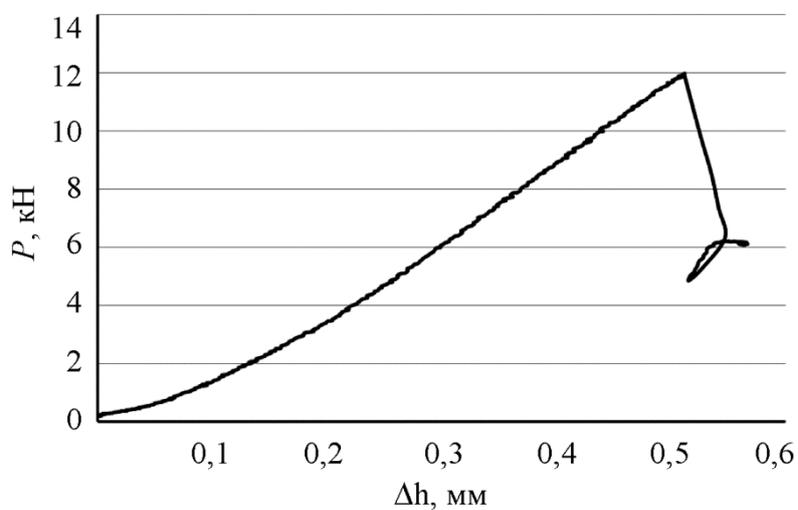


Рис. 10. Пример типичной диаграммы нагружения образца *тунга 1*

Тип 2. Разрушение когезионно-адгезионного типа (рис. 11). В начальный момент нагружения в структуре ППН-покрытия происходит сдвиг по покрытию (когезия в покрытии меньше, чем адгезия между покрытием и графитом), затем происходит сдвиг всего покрытия в целом. Характерная диаграмма нагружения для этого вида разрушений представлена на рис. 12.



Рис. 11. Фотография образца с покрытием, разрушенным по когезионно-адгезионному типу

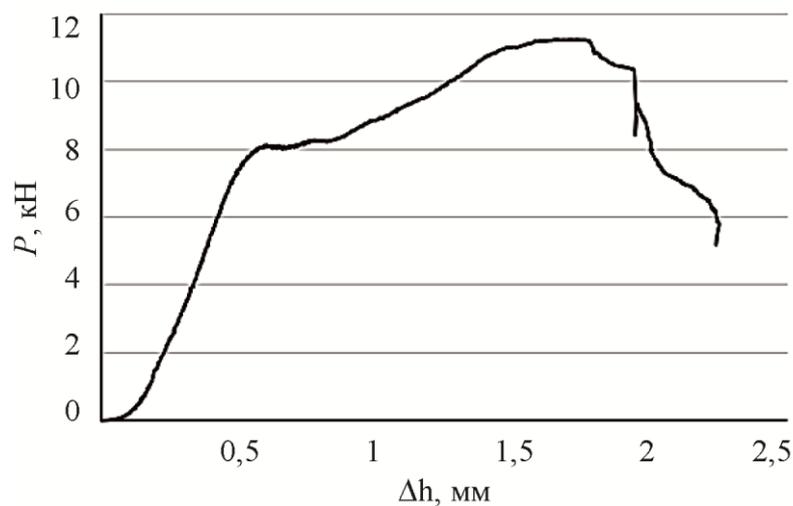


Рис. 12. Пример типичной диаграммы нагружения образца типа 2

Тип 3. Разрушение, когда адгезионная прочность покрытия и графитового образца превышают собственные значения прочности графита (рис. 13). Разрушение происходит по телу графитового образца с отрывом графитового массива на глубину до 5...7 мм. Диаграмма разрушения этого типа представлена на рис. 14.



Рис. 13. Фотография образца с покрытием, разрушенным по телу графитового образца

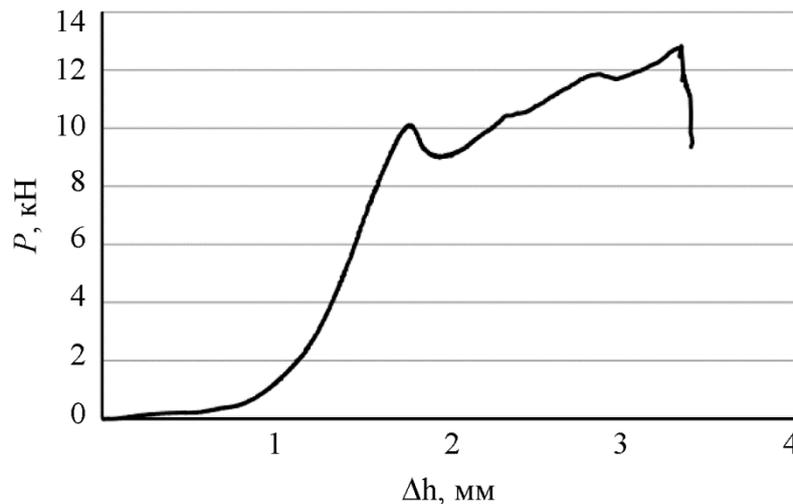


Рис. 14. Пример типичной диаграммы нагружения образца *типа 3*

Анализ результатов прочностных измерений, характера разрушения испытываемых образцов и их внешнего вида после испытаний показывает, что разброс значений стандартного отклонения измеренных величин связан прежде всего с нестабильностью прочностных характеристик графитового материала, а прочность сцепления плазменно-порошковых покрытий, находящихся на уровне 8,0 МПа и выше, сопоставима или превышает собственные прочностные показатели графитового материала. По этой причине в работе представлены результаты испытаний, в которых разрушение образцов проходило по первому и второму типу.

4. Заключение

1. Установлено, что наибольшая прочность сцепления плазменно-порошкового покрытия с графитовой основой достигается при толщине подслоя 80 мкм.
2. В отсутствие возникновения металлургической связи между металлическими покрытиями и графитовой основой, прочность их связи будет формироваться за счет сил механического зацепления и определяться степенью развитости поверхности графита. Поэтому наиболее высокая прочность сцепления плазменно-порошкового покрытия с основой будет в случае нарезки на графитовой основе резьбы глубиной 1,0 мм.
3. Анализ полученных результатов показывает, что наилучшие параметры прочности сцепления достигаются для алюминиевого порошка АСД-0. Этот факт можно объяснить хорошим проплавлением частиц порошка алюминия при напылении, что позволяет им хорошо заполнять профиль поверхности графита. При этом реализуется механизм анкерного зацепления и достигаются высокие показатели сцепления покрытия с графитовой основой.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания, номер государственной регистрации АААА-А18-118020790145-0. Испытания проведены на оборудовании центра коллективного пользования «Пластометрия» Института машиноведения имени Э. С. Горкунова УрО РАН.

Литература

1. Теплофизика плазменного напыления, наплавки, резки и сфероидизации / Н. Н. Рыкалин, И. Д. Кулагин, М. Х. Шоршоров, В. Н. Кудинов, Ю. В. Красулин, В. А. Петруничев, А. А. Углов // Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов. – М. : Наука, 1973. – С. 66–84.

2. Development of Ion-Plasma Refractory Metallic Layers of Heat-Insulating Coatings for Cooled Turbine Rotor Blades / S. A. Budinovskiy, S. A. Muboyadzhyan, A. M. Gayamov, P. V. Matveev // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2014. – Vol. 55. – P. 652–657. – DOI: 10.1007/s11041-014-9684-2.
3. Tarasenko Yu. P., Tsareva N. N., Berdnik O. B. The structure and physical-mechanical properties of the heat-resistant Ni-Co-Cr-Al-Y intermetallic coating obtained using rebuilt plasma equipment // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2014 – Vol. 1, No. 5. – P. 641–650. – DOI: 10.1134/S0869864314050138.
4. Гузанов Б. Н., Косицын С. В., Пугачева Н. Б. Упрочняющие защитные покрытия в машиностроении. – Екатеринбург : УрО РАН, 2004. – 244 с. – ISBN: 5-7691-1405-3.
5. Shevchenko O. I., Trekin G. E., Farber V. M. Distribution of chemical elements in structural components of a facing of a self-fluxing nickel alloy // *Met. Sci. Heat Treat.* – 1997. – Vol. 39, No. 6. – P. 233–235. – DOI: 10.1007/BF02467225.
6. Otsubo F., Era H., Kishitake K. Structure and phases in nickel-base selffluxing alloy coating containing high chromium and boron // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2000. – Vol. 9, iss. 1. – P. 107–113. – DOI: 10.1361/105996300770350131.
7. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик, Ю. С. Борисов, А. С. Мнухин, М. Д. Никитин. – Л. : Машиностроение, 1985. – 199 с.
8. Uusitalo Mikko, Vuoristo Petri, Mäntylä Tapio. Elevated temperature erosion-corrosion of thermal sprayed coatings in chlorine containing environments // *Wear*. – 2002. – Vol. 252, iss. 7–8. – P. 586–594. – DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00014-5.
9. Matthews S., Schweizer M. Optimization of arcsprayed Ni-Cr-Ti coatings for high temperature corrosion applications // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2013. – Vol. 22, iss. 4. – P. 538–550. – DOI: 10.1007/s11666-013-9914-y.
10. Guzanov B. N., Pugacheva N. B., Bykova T. M. Corrosion and erosion resistance of the combined multilayer coating for the protection of critical parts of modern gas turbine engines // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2021. – Iss. 2. – P. 6–21. – DOI: 10.17804/2410-9908.2021.2.006-021. – URL: https://dream-journal.org/issues/2021-2/2021-2_317.html
11. Sivakumar R., Mordike B. L. High temperature coatings for gas turbine blades: a review // *Surface and Coatings Technology*. – 1989. – Vol. 37, iss. 2. – P. 139–160. – DOI: 10.1016/0257-8972(89)90099-6.
12. Mrdak M. R. Mechanical properties and metallographic analysis of plasma spray ABS – Ni5.5wt.%Al5wt.%Mo coatings // *Vojnotehnički glasnik*. – 2019. – Vol. 67, iss. 3. – P. 573–587. – DOI: 10.5937/vojtehg67-17424.
13. Pugacheva N. B. Current trends in the development of heat-resistant coatings based on iron, nickel and cobalt aluminides // *Diagnostics, resource and mechanics of materials and structures*. – 2015. – Iss. 3. – P. 51–82. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.051-082. – URL: https://dream-journal.org/issues/2015-3/2015-3_30.html
14. Guzanov B. N., Obabkov N. V., Migacheva G. N. Development and research of multi-layer composite coatings high temperature // *Sciences of Europe*. – 2017. – No. 16 (16). – P. 261–265.
15. Sidhu S. S., Prakash S. Performance of NiCrAlY, Ni–Cr, Stellite-6 and Ni₃Al coatings in Na₂SO₄–60% V₂O₅ environment at 900° under cyclic conditions // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Vol. 201, iss. 3–4. – P. 1643–1654. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.02.035.
16. Studying the structure and adhesion strength of thermal barriers coating / N. B. Pugacheva, B. N. Guzanov, N. V. Obabkov, T. M. Bykova, N. S. Michurov // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2176. – P. 030013-1–030013-4. – DOI: 10.1063/1.5135137.
17. Особенности создания комбинированных теплостойких покрытий для деталей высокотемпературного назначения / Б. Н. Гузанов, Н. Б. Пугачева, В. Д. Алексеев,

- Е. Ю. Слукин // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 12–19. – DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.02.
18. Фиалков А. С. Формирование структуры и свойств углеродистых материалов. – М. : Металлургия, 1965. – 288 с.
19. Кречмар Э. Напыление металлов, керамики и пластмасс / пер. с нем. Е. М. Стрельцова, Д. Н. Маневич. – М. : Машиностроение, 1966. – 432 с.
20. Анализ свойств газотермических покрытий : учеб. пособие : в 2 ч. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – Ч. 1 : Коробов Ю. С., Панов В. И., Разиков Н. М. Основные методы и материалы газотермического напыления. – 80 с.
21. Фиалков А. С., Варлаков В. П., Смирнова Т. Ю. Микроструктура нефтяного и пекового коксов // Химия твердого топлива. – 1994. – № 2. – С. 49–53.
22. Уббелоде А. Р., Льюис Ф. А. Графит и его кристаллические соединения / пер. с англ. – М. : Мир, 1965. – 256 с.
23. Дорожкин Н. Н. Методические рекомендации по определению адгезионной прочности покрытий. – Минск : ИНДмаш, 1985. – 54 с.
24. Рыжов Э. В., Суслов А. Г., Федоров В. П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. – М. : Машиностроение, 1979. – 176 с.
25. Родичев А. Ю., Сытин А. В., Тюрин В. О. Исследование прочности сцепления покрытия цапф роторно-опорных узлов экспериментальной установки // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – Вып. 9. – С. 269–276.
26. Пустыльник Е. Н. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М. : Наука, 1968. – 288 с.
27. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник. – М. : Машиностроение, 1985. – 231 с.