

**FORMATION OF COMPOSITE COATING
«NICKEL-SILICON CARBIDE»**

Svetlana Kamilevna Kiseleva^{1, 2a}, *Linar Dinarovich Akhmerov*¹,
*Rasil Flarisovich Mustafin*¹, *Vasily Vasilievich Lukyanov*^{1, 2}, *Vladimir Vasilyevich Astanin*^{1, 3}

¹ Scientific and Industrial Association «Technopark of Aviation Technologies», 5 Tramvaynaya str., building 1, 450027, Ufa, Russia

² Ufa State Petroleum Technological University, 1 Kosmonavtov str., 450064, Ufa, Russia

³ Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St., 450076, Ufa, Russia

^a kiseleva_s2018@mail.ru

ABSTRACT

The influence of processed sample position relative to the equipment bottom and electrolyte mixing speed during an electrochemical processing aluminum alloy AK7 samples surface on a formed metal matrix composite coating «Ni+SiC» quality was considered. It has been shown that the composite coating microstructure formed in a glass container under the horizontal sample positioned with a minimum mixing speed and in a vertical equipment with the automatic stirring possibility has significant differences. The quality of the «Ni+SiC» composite coating is determined by the position of the sample being processed relative to the bath bottom and the electrolyte speed mixing. It has been established that with a horizontal sample position and minimal electrolyte mixing speeds, a composite nickel coating is being formed with a uniform distribution of strengthening SiC particles with a volume fraction of 24%, a rough surface and single pores. With a vertical position and high electrolyte mix speeds, a coating is being formed with a volume strengthening particles fraction of 2% and a smooth surface without pores. It is proposed to develop a horizontal-vertical equipment for electrodeposition, allowing stably produce a «Ni+SiC» composite coating with a uniform strengthening particles distribution and a minimal roughness based on the obtained results.

KEYWORDS

Metal matrix composite coatings; electrodeposition; roughness; silicon carbide.

**ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ
«НИКЕЛЬ-КАРБИД КРЕМНИЯ»**

Светлана Камильевна Киселева^{1, 2a}, *Линар Динарович Ахмеров*¹,
*Расиль Фларисович Мустафин*¹, *Василий Васильевич Лукьянов*^{1, 2},
Владимир Васильевич Астанин^{1, 3}

¹ Научно-производственная ассоциация «Технопарк Авиационных технологий», ул. Трамвайная 5, к.1, 450027, Уфа, Россия

² Уфимский государственный нефтяной технический университет, ул. Космонавтов, 1, 450064, Уфа, Россия

³ Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди 32, 450076, Уфа, Россия

^a kiseleva_s2018@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассмотрено влияние положения обрабатываемого образца относительно дна установки и скорости перемешивания электролита при электрохимической обработке поверхности образцов алюминиевого сплава АК7 на качество формируемого металломатричного композитного покрытия «Ni+SiC». Показано, что микроструктура композиционного покрытия, формируемая в стеклянной емкости при горизонтальном расположении образца с минимальной скоростью размешивания и в вертикальной установке с возможностью автоматического перемешивания, имеет существенные различия. Качество композиционного покрытия «Ni+SiC» определяется положением обрабатываемого образца относительно дна ванны и скоростью перемешивания электролита. Установлено, что при горизонтальном расположении образца и минимальных скоростях перемешивания электролита формируется композитное никелевое покрытие с однородным распределением упрочняющих частиц SiC с объемной долей 24%, шероховатой поверхностью и единичными порами. При вертикальном расположении образца и высоких скоростях перемешивания электролита формируется покрытие без пор с объемной долей упрочняющих частиц SiC – 2% и, ровной поверхностью. На основании полученных результатов предлагается разработка горизонтально-вертикальной установки для электроосаждения, позволяющая стабильно получать композитное покрытие «Ni+SiC» с однородным распределением упрочняющих частиц и минимальной шероховатостью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Металломатричные композиционные покрытия; электроосаждение; шероховатость; карбид кремния.

Введение

Как известно, одним из недорогих и наиболее распространенных способов нанесения металломатричных композиционных покрытий является электролитическое осаждение, при котором протекает процесс оседания металла в виде тонкого слоя на электропроводящую поверхность деталей или изделий из электролитов, содержащих дисперсную фазу [1, 2]. В качестве упрочняющих частиц выступают твердые оксиды или карбиды, такие как Al_2O_3 , SiC, TiO_2 , WC, SiO_2 и др [3, 4]. Благодаря включению частиц в покрытие его эксплуатационные свойства, такие как износостойкость и устойчивость к истиранию, повышаются [5], что позволяет успешно проводить операции по поверхностному упрочнению конструкционных деталей.

Одним из самых изученных видов композиционных покрытий является «никасил» – покрытие на основе электроосажденной матрицы – никеля, упрочненного частицами карбида кремния SiC [6–8]. Покрытие

«Ni+SiC» широко используется в производстве автомобильных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), в частности, для упрочнения рабочих поверхностей алюминиевых цилиндров, и продемонстрировало свою эффективность в качестве противоизносных покрытий [9, 10].

Качество композиционного покрытия «Ni+SiC» зависит от сочетания таких параметров, как состав электролита, содержание частиц карбида кремния, температуры обработки, плотности тока и скорости перемешивания [11–15]. Полученное покрытие характеризуется высокими показателями микротвердости [8], улучшенными трибологическими и антикоррозионными свойствами, по сравнению с покрытиями из чистого металла, например, никеля [10, 15].

Среди недостатков композиционных покрытий, получаемых при электроосаждении, стоит отметить многофакторность накладываемых параметров обработки и, как следствие, нестабильность результатов. Отмечается образование объемных дефектов в виде

пор в объеме покрытия и, следовательно, снижение его функциональных свойств [14, 16], а также формирование покрытия с высокой шероховатостью за счет неоднородного наложения композита «Ni+SiC» [17, 18]. Как известно, шероховатая поверхность покрытия деталей поршневой группы ДВС подвергается финальной доводке за счет операций механической обработки, минимизация которых является актуальным направлением. В связи с этим стоит задача модернизации процесса электроосаждения металломатричного композиционного покрытия «Ni+SiC» с целью нивелирования особенностей нанесения.

Целью данной работы является изучение влияния технологических особенностей установки электролитического осаждения на качество металломатричного композиционного покрытия «Ni+SiC».

1. Материал и методы исследования

Исследовательская часть работы была проведена на плоских образцах алюминиевого литейного сплава АК7 (Al – 7%Si, ГОСТ 1583-93).

Электрохимической обработке подвергались плоские образцы длиной 20 мм, шириной 10 мм и толщиной 4 мм. Перед погружением в электролит образцы помещали в ультразвуковую ванну с ацетоном, далее

промывали теплой дистиллированной водой и травили в растворе плавиковой (HF) и азотной кислот (HNO₃). После травления образцы дважды промывали в дистиллированной воде комнатной температуры.

Для нанесения покрытия «Ni+SiC» использовали раствор следующего состава, гр/л: одиночная соль никеля (NiSO₄·7H₂O) – 300, хлорид никеля (NiCl₂) – 30, борная кислота (H₃BO₃) – 30, лаурилсульфат натрия (C₁₂H₂₅SO₄Na) – 1,5, карбид кремния (SiC) – 150 [19, 20]. Режим обработки: плотность тока 10 А/дм²; продолжительность 60 минут; температура 60 °С.

Для нанесения покрытия использовали две установки (рис. 1).

Установка 1 (рис. 1, а) представляет собой стеклянную емкость, в которую заливается раствор и помещается никелевый катод. Образец крепится горизонтально. Перемешивание электролита осуществляется вручную.

Установка 2 (рис. 1, б) представляет собой цилиндрическую ванну с вертикальным расположением никелевого катода. Образец крепится вертикально по отношению к катоду. Установка снабжена устройством для автоматического вертикального перемешивания раствора с различной скоростью. Скорость перемешивания варьировали в пределах $n = 5-300$ об/мин.

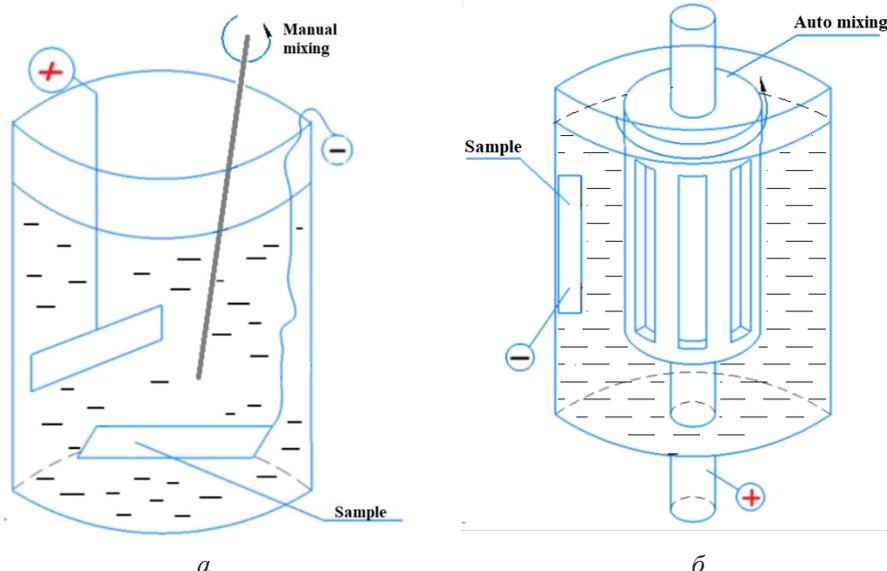


Рис. 1. Установка для нанесения покрытия: а – установка 1; б – установка 2

Fig. 1. Coating equipment: а – equipment 1; б – equipment 2

В результате электрохимической обработки на установке 1 было получено покрытие 1, на установке 2 при скорости перемешивания $n = 50$ об/мин – покрытие 2.

Для оценки толщины покрытий и объемной доли частиц карбида кремния проводили съемку изображений системы «основной металл АК7 – покрытие» с помощью оптического микроскопа «Olympus GX51». Перед съемкой образцы заливали в жидкую эпоксидную смолу и после отверждения проводили их установку на предметный столик микроскопа. Объемную долю частиц карбида кремния определяли наложением сетки на изображения покрытия [21].

Качественная оценка содержания химических элементов в составе покрытия проводилась с использованием рентгеновского

микроанализатора «INCA-Energy», которым оснащен растровый электронный микроскоп (РЭМ) «JSM-6490 LV».

2. Результаты и их обсуждение

В результате электроосаждения было получено композитное покрытие никеля с частицами карбида кремния. Об этом однозначно свидетельствуют изображения системы «основной металл АК7 – покрытие» (рис. 2) и оценка элементного состава покрытия 1 (рис. 2, табл. 1). Средний размер частиц кремния составил 6 мкм. Визуально видно, что покрытие характеризуется хорошей адгезией с материалом основы. Поры вдоль переходной зоны от материала основы к покрытию обнаружены не были.

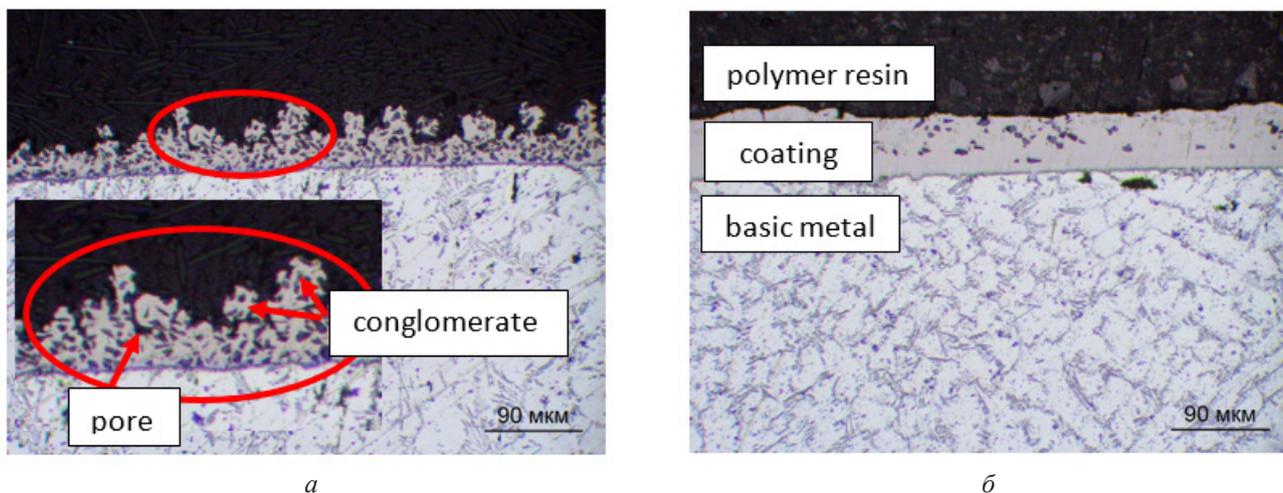


Рис. 2. Микроструктура покрытия: а – покрытие 1; б – покрытие 2

Fig. 2. Coating microstructure: a – coating 1; б – coating 2

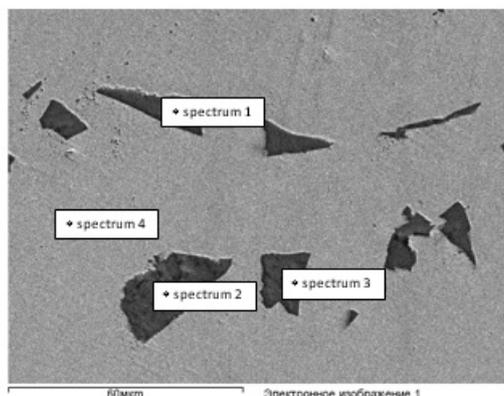


Рис. 3. Области определения элементного состава покрытия 1

Fig. 3. Regions for determining the coating 1 elemental composition

Таблица 1. Элементный состав покрытия 1 по областям согласно рис. 2**Table 1.** Elemental composition of coating 1 by areas according to fig. 2

№ спектр / spectrum	C	Si	Ni	итог / total
спектр 1 / spectrum 1	38,09	59,67	2,24	100
спектр 2 / spectrum 2	42,24	56,71	1,05	100
спектр 3 / spectrum 3	–	97,28	2,72	100
спектр 4 / spectrum 4	–	–	100	100

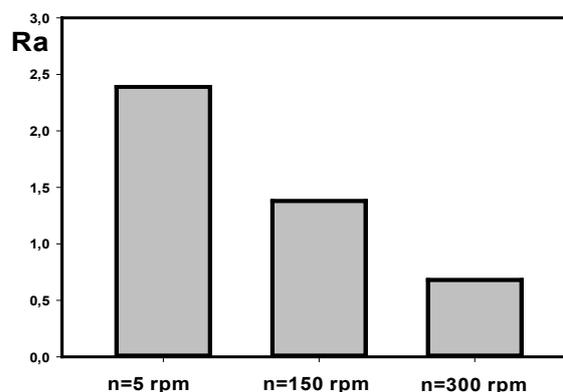
Как известно [22], при электроосаждении материал композиционного покрытия «Ni+SiC» начинает формироваться непосредственно в электролите. Вокруг частиц карбида кремния происходит наслаивание никеля, при этом в основе может располагаться не одна частица карбида кремния, а несколько, как можно видеть на рис. 2, а. Полученный слоеный конгломерат неправильной формы направляется к образцу и оседает на его поверхности.

Для покрытия 1 (рис. 2, а), полученного в стеклянной емкости и при горизонтальном расположении обрабатываемого образца, отмечены следующие особенности: распределение частиц SiC однородно по всей площади (рис. 2, а); наличие «рваных» краев (глубоких выступов и впадин) и образование в процессе электроосаждения единичных пор. Средняя толщина покрытия – 95 ± 5 мкм, объемная доля частиц карбида кремния – 24%.

Для вертикальной установки наблюдается относительно ровная поверхность и отсутствие пор. Средняя толщина покрытия – 50 ± 3 мкм, объемная доля частиц кремния – 2%. Покрытия характеризуются случайным расположением частиц кремния в никелевой матрице, независимо от скорости перемешивания. В структуре покрытия наблюдаются протяженные области без частиц. Полученные результаты противоречат данным статьи [14], где авторы отмечают уско-

рение осаждения частиц SiC с увеличением скорости перемешивания, которая достигла максимума. Дальше происходит снижение скорости осаждения, что объясняется высокой скоростью удара частиц с катодом при возрастающих скоростях перемешивания и недостаточностью времени для фиксирования их на катоде. Об обеднении упрочняющей фазы в покрытии при повышении частоты колебаний вибрирующей площадки отмечается авторами другой статьи [23].

Положительное влияние скорости перемешивания отмечается на качестве поверхности покрытия, а, следовательно, и на численных показателях шероховатости. Как видно из рис. 4, – чем выше скорость перемешивания, тем ниже шероховатость поверхности покрытия.

**Рис. 4.** Шероховатость поверхности покрытия, установка 2**Fig. 4.** Coating surface roughness, equipment 2

Таким образом, микроструктура покрытия, формируемая в стеклянной емкости с минимальной скоростью размешивания и в вертикальной установке с возможностью автоматического перемешивания, имеет существенные различия. Как отмечается [15], гидродинамический поток и связанный с ним процесс внедрения частиц карбида кремния в никелевую матрицу зависит от геометрии ванны и покрываемой детали, и расположения образца относительно дна ванны. С физической точки зрения на частицы карбида кремния в процессе электроосаждения действуют электростатические силы, сила гравитации, а также сила инерции, которая с увеличением скорости перемешивания возрастает.

В случае горизонтального расположения образца в стеклянной емкости – сила гравитации играет положительную роль, способствуя легкому оседанию частиц на поверхность, без необходимости высоких скоростей перемешивания. Однако отсутствие интенсивного размешивания отрицательно сказывается на формировании ровной поверхности покрытия, которое характеризуется значительными выступами и впадинами, следовательно, увеличивается степень последующей его механической обработки. Пористость покрытия, отмеченная на рис. 2, а, может быть также связана с небольшой скоростью перемешивания раствора и, как следствие, отсутствием внешнего давления.

Для образца, расположенного вертикально при низких скоростях перемешивания, по всей видимости, силы инерции не хватает для фиксации частиц в никелевой матрице, и они оседают на дне ванны. Однако и повышение скорости перемешивания не способствует их внедрению. Как известно [24], частицы карбида кремния имеют отрицательный заряд, что замедляет их сцепление с поверхностью основного материала и включение в покрытие. Процесс переноса частиц протекает, как отмечается в работах [25, 26], также за счет адсорбции катионов осаждаемого металла

на их поверхность. Ионы, адсорбированные на частицах, становятся мостиковой связкой дисперсной фазы с поверхностью катода. О наслаивании никеля на частицы карбида кремния отмечается в работе [22] и подтверждается текущими микроструктурными исследованиями покрытия, представленными на рис. 2, а, где отчетливо видно оседание конгломератов «Ni+SiC» на покрываемую поверхность образца. Можно предположить, что интенсивное перемешивание или не позволяет конгломератам сформироваться, или они быстро разрушаются под действием инерционной силы, тем самым, не позволяя частицам приобрести требуемый заряд и внедриться в никелевую матрицу. Как итог, формируется покрытие, состоящее из никелевой матрицы с точечным расположением частиц карбида кремния. Инерционная сила играет положительную роль в формировании ровной поверхности и снижает ее шероховатость тем интенсивнее, чем больше скорость перемешивания (рис. 3, б, рис. 4). Для покрытия 2 также представляется очевидной динамическая причина уплотнения пор под действием внешнего давления, вызванного инерционной силой по аналогии механизма залечивания пор в условиях горячего изостатического прессования (ГИП) монокристаллов жаропрочных сплавов [27].

Стоит предположить, что разработка установки для электроосаждения, сочетающая преимущества однородного оседания упрочняющих частиц при горизонтальном расположении образца, а также выравнивания поверхности и отсутствия пор за счет интенсивного перемешивания, позволит стабильно формировать качественное металлматричное композитное покрытие «Ni+SiC» на поверхности образцов алюминиевого сплава. За счет возможности автоматического переключения скорости перемешивания с минимальной до максимальной станет возможным получать слоеные композиционные покрытия. Низкая шероховатость поверхности покрытия будет способствовать минимизации окончательной технологической

операции механической обработки. Установка позволит наносить покрытия на исключительно внутреннюю полость цилиндра, без затрагивания внешней и может стать хорошей альтернативой для стандартных гальванических ванн.

Выводы

1. В результате электрохимической обработки поверхности алюминиевого сплава АК7 в двух установках, было сформировано металломатричное композиционное покрытие, состоящее из никелевой матрицы, упрочненной частицами карбида кремния SiC.

2. Качество композиционного покрытия «Ni+SiC» определяется положением обрабатываемого образца относительно дна ванны и скоростью перемешивания электролита.

3. При горизонтальном расположении обрабатываемого образца и минимальных скоростях перемешивания электролита формируется покрытие на основе никеля с однородным распределением упрочняющих частиц SiC, объемная доля которых составляет 24%, а также шероховатой поверхностью и единичными порами.

4. При вертикальном расположении обрабатываемого образца и высоких скоростях перемешивания электролита формируется покрытие с объемной долей упрочняющих частиц – 2%, ровной поверхностью и с отсутствием пор.

Благодарности / Acknowledgments

Работа проводилась в рамках реализации Стратегического проекта «Новые технологии, технические и интеллектуальные системы в машиностроении» программы развития ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» на 2021-2030 годы в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

Авторы выражают свою благодарность за финансовую поддержку проекта.

The work was carried out as a part of the implementation of the Strategic Project «New Technologies, Technical and Intelligent Systems in Mechanical Engineering» of the Ufa State Petroleum Technical University Development Program for 2021-2030 in accordance with the strategic academic leadership program «Priority 2030».

The authors express their gratitude for the financial support of the project.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Garcia I., Conde A., Langelaan G., Fransaeer J., Celis J.P. Improved corrosion resistance through microstructural modifications induced by codepositing SiC-particles with electrolytic nickel // Corrosion Science, 45, 1173-1189(2003). DOI: 10.1016/S0010-938X(02)00220-2
2. Vinokurov E.G., Margolin L.N., Farafonov V.V. Electrodeposition of composite coatings // News of universities. Chemistry and Chemical Technology. 63 (8) 4-38 (2020). (In Russian) [Винокуров Е.Г., Марголин Л.Н., Фарафонов В.В. Электроосаждение композиционных покрытий // Известия вузов. Химия и химическая технология. 63 (8) 4-38 (2020)]. DOI: 10.6060/ivkkt.20206308.6212
3. Hovestad A., Janssen L. J. J. Electrochemical codeposition of inert particles in a metallic matrix // Journal of Applied Electrochemistry, 25, 519-527 (1995). DOI: 1007/BF00573209
4. Giftou, P., Pavlatu E.A., Spirellis N. Composite electrochemical coatings (CEC) of increased hardness based on Ni matrix containing SiC nanoparticles. Electroplating and Surface Treatment. IX (1) 23-28 (2001). (In Russian) [Гифту, П., Павлату Е.А., Спиреллис Н. Композиционные электрохимические покрытия (КЭП) повышенной твердости на основе Ni матрицы, содержащие наночастицы SiC. Гальванотехника и обработка поверхности. IX (1) 23-28 (2001)].
5. Ivanov V.V., Balakai V.I., Shcherbakov I.N., Arzumanova A.V., Starunov A.V., Murzenko K.V. Preparation and properties of a nickel-based composite coating // Advances in Modern Science 1, 1335 -1338 (2015). (In Russian) [Иванов В.В., Балакай В.И., Щербаков И.Н., Арзуманова А.В., Старунов А.В., Мурзенко К.В. Получение и свойства композиционного покрытия на основе никеля // Успехи современного естествознания 1, 1335-1338 (2015)].
6. Zhou Y., Zhang H., Qian B. Friction and wear properties of the co-deposited Ni-SiC nanocomposite coating // Applied Surface Science, 253, 8335-8339 (2007). DOI:10.1016/j.apsusc.2007.04.047

7. Socha R.P., Laajalehto K., Nowak P. Influence of the surface properties of silicon carbide on the process of SiC particles codeposition with nickel // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 208, 267-275 (2002). DOI:10.1016/S0927-7757(02)00153-X
8. Hachemi Ben Temam, Larbi Zeroual, Abdelouahad Chala, Saad Rahmane, Corinne Nouveau Microhardness and Corrosion Behavior of Ni-SiC Electrodeposited Coatings // *Plasma Processes and Polymers*, 4, 618-621 (2007).
9. Roos J.R., Celis J.P., Fransaeer J., Buelens C. The development of composite plating for advanced materials // *JOM*, 42 60-63 (1990). DOI:10.1007/BF03220440
10. Garcia I., Fransaeer J., Celis J.-P. Electrodeposition and sliding wear resistance of nickel composite coatings containing micron and submicron SiC particles // *Surface and Coatings Technology*, 148, 171-178 (2001). DOI:10.1016/S0257-8972(01)01336-6
11. Izzah Aqilah Ariffin, Zakiah Kamdi Review on Wear Behavior of Nickel-Silicon Carbide Electrodeposition Coating // *Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering* 3(1) 377-384 (2022): 10.30880/rpmme.2022.03.01.039
12. Hovestad A., Janssen L. J. J. Electrochemical codeposition of inert particles in a metallic matrix // *Journal of applied electrochemistry* 25 519-527 (1995). DOI:1007/BF00573209
13. Ivanov V.V., Balakai V.I., Arzumanova A.V. The mechanism of electrodeposition of nickel from a chloride electrolyte // *International Journal of Experimental Education* 3, 279-283 (2016). (In Russian) [Иванов В.В., Балакай В.И., Арзуманова А.В. Механизм электроосаждения никеля из хлоридного электролита // *Международный журнал экспериментального образования* 3, 279-283 (2016)].
14. Hong-Kee Lee, Ho-Young Lee, Jun-Mi Jeon. Codeposition of micro- and nano-sized SiC particles in the nickel matrix composite coatings obtained by electroplating // *Surface and Coating Technology*, 201, 4711-4717 (2007). DOI:10.1016/j.surfcoat.2006.10.004
15. Kholkin O.S., Kurbatov A.P., Sokolov A.Yu. Influence of nickel electrodeposition conditions on the physicochemical and corrosion properties of coatings // *Vestnik KazNU. Chemical series.* 3 (75) 33-42 (2014). (In Russian) [Холкин О.С., Курбатов А.П., Соколов А.Ю. Влияние условий электроосаждения никеля на физико-химические и коррозионные свойства покрытий // *Вестник КазНУ. Серия химическая.* 3 (75) 33-42 (2014)].
16. Shluger M.A. Galvanic coatings in mechanical engineering. Directory. Moscow. Mechanical Engineering, 1985. 248 p. (In Russian) [Шлугер М.А. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник. М. : Машиностроение, 1985. 248 с.]
17. M. S. Eremkina, I. R. Aslanyan Nickel plating of power plant parts from the AlSi10Mg alloy produced by selective laser melting // *Vestnik UGATU.* 27(2) 53-59 (2023). (In Russian) [М. С. Еремкина, И. Р. Асланян Нанесение никелевых покрытий на детали энергоустановок из сплава AlSi10Mg, полученные селективным лазерным сплавлением // *Вестник УГАТУ.* 27(2) 53-59 (2023)].
18. Dedeloudis C., Kaisheva M.K., Muleshkov N., Mueshkov T., Nowak P., Fransaeer J., Celis J.P., Electrolytic Codeposition of Submicron Silicon Carbide with Nickel // *Plat. Surf. Finish*, 86(8), 57-60 (1999).
19. Patent No. CN1029996C, 18.11.1999.
20. Patent No. CN113061890A, 02.07.2021.
21. Saltykov S. A. Stereometric metallography. Moscow. Metallurgiya, 1976. 270 p. (In Russian) [Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М.: Metallurgiya, 1976. 270 с.]
22. Galevsky G.V., Rudneva V.V., Garbuzova A.K. Electrodeposition, structure and properties of the nickel-titanium carbide composite coating // *Scientific and Technical Journal of St. Petersburg State Polytechnic University.* 1 (214) 154-164 (2015). (In Russian) [Галевский Г.В., Руднева В.В., Гарбузова А.К. Электроосаждение, структура и свойства композиционного покрытия «никель — карбид титана» // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.* 1 (214) 154-164 (2015)].
23. Krasikov A.V., Markov M.A., Krasikov V.L., Kravchenko I.N., Staritsyn M.V., Bykova A.D., Belyakov A.N., Influence of vibration parameters during electrodeposition of Ni composite coatings -SiC from vibration-stabilized suspension // *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability* 4 21-27 (2022). (In Russian) [Красиков А. В., Марков М. А., Красиков В. Л., Кравченко И. Н., Старицын М. В., Быкова А. Д., Беляков А. Н., Влияние параметров вибрации при электроосаждении композиционных покрытий Ni-SiC из вибрационно-стабилизированной суспензии // *Проблемы машиностроения и надежности машин* 4 21-27 (2022)]. DOI:10.31857/S0235711922040113
24. Mingazova G. G., Fomina R. E., Vodopyanova S. V., Saifullin R. S., Zhilyakov V. V. Physico-chemical properties of nickel composite coatings // *Bulletin of the Technological University.* 20 (15) 42-44 (2017). (In Russian) [Мингазова Г. Г., Фомина Р. Е., Водопьянова С. В., Сайфуллин Р. С., Жилияков В. В. Физико-химические свойства никелевых композиционных покрытий // *Вестник технологического университета.* 20 (15) 42-44 (2017)].
25. Tseluikin V.N., Yakovlev A.V. On electrochemical deposition and properties of nickel-based composite coatings // *Physical Chemistry of Surfaces and Materials*

Protection. 56(2) 197-201 (2020). (In Russian) [Целуйкин В. Н., Яковлев А. В. Об электрохимическом осаждении и свойствах композиционных покрытий на основе никеля // Физикохимия поверхности и защита материалов. 56(2) 197-201 (2020)]. DOI: 0.31857/S004418562002028X

26. Tseluikin V. N., Vasilenk E. A., Nevernaya O. G., Tseluikina G. V., Surmenko E. L. Physico-mechanical properties of composite coatings based on a nickel-chromium alloy // Condensed Media and Interphase Boundaries. 15(2) 156-159. (In Russian) [Целуйкин В. Н., Василенк Е. А., Неверная О. Г., Целуйкина Г. В.,

Сурменко Е. Л. Физико-механические свойства композиционных покрытий на основе сплава никель-хром // Конденсированные среды и межфазные границы. 15(2) 156-159].

27. Bokshstein B., Epishin A., Svetlov I., Esin V., Rodin A., Link T. Growth and healing of pores in single crystals of nickel-based heat-resistant alloys // Journal of Functional Materials. 1(5) 2007. (In Russian) [Бокштейн Б., Епишин А., Светлов И., Есин В., Родин А., Линк Т. Рост и залечивание пор в монокристаллах жаропрочных сплавов на никелевой основе // Журнал функциональных материалов. 1(5) 2007].