

**ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОГО НИКЕЛИРОВАНИЯ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ****В.А. Скрябин**

vs_51@list.ru

А.Е. Зверовщиков

azwer@mail.ru

Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация**Аннотация**

При исследовании влияния покрытия на износостойкость деталей из алюминиевых сплавов в производственных условиях поставлен многофакторный эксперимент. Выполнены исследования предварительной финишной обработки под покрытие, а также по нанесению никель-фосфорного покрытия на поверхность деталей из алюминиевых сплавов. Выбраны параметры, влияющие на скорость осаждения никель-фосфорного сплава, и режимы обработки поверхности детали под покрытие. Проведено планирование эксперимента, что дало возможность отработать оптимальные режимы осаждения и состав покрытия для получения высоких показателей качества его поверхности — шероховатости и износостойкости. Установлено, что при увеличении концентрации гипофосфита (соль щелочного металла натрия и фосфорноватистой кислоты) скорость образования покрытия увеличивается. Проведены экспериментальные исследования по износостойкости образцов с никель-фосфорным покрытием и без покрытия. Показано, что нанесенные химическим никелированием на образцы покрытия обеспечивают более высокую износостойкость в условиях трения по сравнению с образцами без покрытия. Предположено, что равномерность гетерогенного покрытия, в которое входят никель и фосфор, связана с равномерной мелкокристаллической структурой, состоящей из частиц правильной формы (ограниченной или округлой). Используются основные положения технологии химического нанесения покрытия и технологии машиностроения

Ключевые слова

Покрытие, обработка, планирование, эксперимент, износостойкость

Поступила 12.05.2021

Принята 06.07.2021

© Автор(ы), 2022

Работа выполнена в рамках проекта № 0748-2020-0010 «Научные принципы формирования гетерогенных структур методами физико-химического диспергирования» (государственное задание вузу в сфере научной деятельности. Заказчик Минобрнауки России)

Введение. Химическое никелирование достаточно широко внедряется в технологию нанесения покрытий за счет высоких показателей качества покрытия на основе никеля [1–4]. Химическое никелирование осуществляется более просто и эффективно по сравнению с электрохимическим никелированием и энергетически менее затратное. Кроме того, покрытие, получаемое при нанесении никеля химическим способом, показало хорошую сцепляемость с материалом основы изделия. Поэтому задача исследования химического никелирования деталей из алюминиевых сплавов является весьма актуальной.

Материалы и методы решения задач. В настоящей работе использованы основные положения технологии нанесения никель-фосфорного сплава и технологии машиностроения в плане экспериментов по финишной обработке поверхности детали до нанесения покрытия. Для изучения воздействия параметров технологического процесса никелирования на характер образования покрытия использована методика многофакторного планирования результатов исследований и проведены соответствующие эксперименты [5–8].

Толщина покрытия составляет 10...150 мкм; отклонение равномерности толщины не более $\pm 0,2$ мкм; полная идентификация формы детали. Равномерность толщины гетерогенного никель-фосфорного покрытия, по-видимому, связана с его равномерной мелкокристаллической структурой, состоящей из частиц правильной формы (ограниченной или округлой).

Результаты исследования. Эксперименты проводились на образцах из сплава алюминия марки Д1Т размером 20 × 20 мм и толщиной 2 мм, которые предварительно обрабатывались мягкими (войлочными) шлифовальными кругами до значения параметра шероховатости $Ra = 0,16$ мкм. На круги наносилась клеевая связка с абразивным материалом марки 24А (белый электрокорунд) зернистостью 4–6 ($F220$ – $F180$). Режимные параметры полирования определяли в процессе натуральных экспериментов: скорость вращения войлочного круга $v = 20$ м/с, глубина резания $t = 0,01$ мм, поперечная подача круга $S = 0,001$ мм/об, давление круга на деталь $p = 0,18$ МПа. Для повышения прочности сцепления химического никеля с поверхностью из алюминиевого сплава проведена двойная цинкатная обработка. Далее на поверхность образцов в ванне с подогретым до 90 °С раствором химическим путем осаждался никель-фосфорный сплав [9–12]. Определяющие параметры никель-фосфорного раствора — это концентрация хлористого никеля и гипофосфита натрия, температура и водородный показатель раствора. Приведенные экспериментальные параметры

служат исходными данными для создания регрессионного уравнения в кодовых переменных:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4. \quad (1)$$

Процентное содержание хлористого никеля и гипофосфита в растворе, его температура и водородный показатель или мера кислотности приведены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровни варьирования	Процентное содержание		Температура раствора x_3 , °С	рН раствора x_4 (мера кислотности)
	хлористого никеля x_1 , г/л	гипофосфита x_2 , г/л		
Основной	30	20	75	5
Верхний	90	30	100	6
Нижний	30	10	50	4
Интервал варьирования	60	20	50	2

Матрица планирования эксперимента x_3 (30 °С) = -1, x_3 (90 °С) = 1 приведена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования экспериментов

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
x_1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
x_2	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
x_3	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
x_4	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
y	15	17	18	19	1,5	1,8	1,8	2	10	11	1,8	12	7,5	8	8	6

Экспериментально получены следующие значения скорости y осаждения сплава: $y_1 = 15$ мкм/ч; $y_2 = 17$ мкм/ч; $y_3 = 18$ мкм/ч; $y_4 = 19$ мкм/ч; $y_5 = 1,5$ мкм/ч; $y_6 = 1,8$ мкм/ч; $y_7 = 1,8$ мкм/ч; $y_8 = 2$ мкм/ч; $y_9 = 10$ мкм/ч; $y_{10} = 11$ мкм/ч; $y_{11} = 11$ мкм/ч; $y_{12} = 12$ мкм/ч; $y_{13} = 7,5$ мкм/ч; $y_{14} = 8$ мкм/ч; $y_{15} = 8$ мкм/ч; $y_{16} = 6$ мкм/ч. Полученные значения скорости являются средними из трех параллельных экспериментов.

Результаты исследований обработаны с помощью программного продукта MathCAD15, получены коэффициенты пропорциональности регрес-

сионного уравнения, зависящие от условий осаждения никель-фосфорного сплава.

После определения коэффициентов пропорциональности определена их значимость по критерию Стьюдента.

Окончательно регрессионное уравнение приведем в следующем виде:

$$y = 8,775 - 0,825x_1 + 0,2x_2 + 4,2x_3 + 0,758x_4 + 0,35x_{12} - 0,675x_{123}. \quad (2)$$

Сравнение табличного ($F_{\text{табл}} = 8,96$) и расчетного ($F_{\text{расч}} = 7,38$) значений критерия Фишера показало, что приведенную математическую модель можно считать адекватной с доверительной вероятностью 95 %. Декодируя переменные параметры, получаем:

$$x_1 = \frac{(C_{\text{NiCl}_2} - 30)}{30}; \quad x_2 = \frac{(C_{\text{NaH}_2\text{PO}_2} - 20)}{10}; \quad (3)$$

$$x_3 = \frac{(t - 75)}{25}; \quad x_4 = \text{pH} - 5.$$

В результате действительную модель запишем так:

$$v = 8,775 - 0,825 \frac{(C_{\text{NiCl}_2} - 30)}{30} + 0,2 \frac{(C_{\text{NaH}_2\text{PO}_2} - 20)}{10} + 4,2 \frac{(t - 75)}{25} + 0,758 (\text{pH} - 5) + 0,35 \frac{(C_{\text{NiCl}_2} - 30)}{30} \frac{(C_{\text{NaH}_2\text{PO}_2} - 20)}{10} - 0,675 \frac{(C_{\text{NiCl}_2} - 30)}{30} \frac{(C_{\text{NaH}_2\text{PO}_2} - 20)}{10} \frac{(t - 75)}{25} =$$

$$= -7,142 - 0,00535 C_{\text{NiCl}_2} - 0,0049 C_{\text{NaH}_2\text{PO}_2} + 0,758 \text{pH} + 0,16t + 0,00058 C_{\text{NaCl}_2} C_{\text{NaH}_2\text{PO}_2}.$$

Регрессионное уравнение описывает воздействие технологических факторов на скорость осаждения покрытия.

На основании планирования экспериментов построены графические зависимости (рис. 1, 2). Установлено, что при увеличении концентрации гипофосфита (соли щелочного металла натрия и фосфорноватистой кислоты) в диапазоне 5...10 г/л скорость образования покрытия вначале увеличивается, а при концентрации хлористого никеля более 50 г/л уменьшается (см. рис. 1).

Увеличение концентрации никелевой соли более 30 г/л уменьшает скорость осаждения никель-фосфорного сплава. Это объясняется, по-видимому, тем, что за счет подкисления раствора в процессе осаждения pH снижается, что уменьшает скорость осаждения раствора.

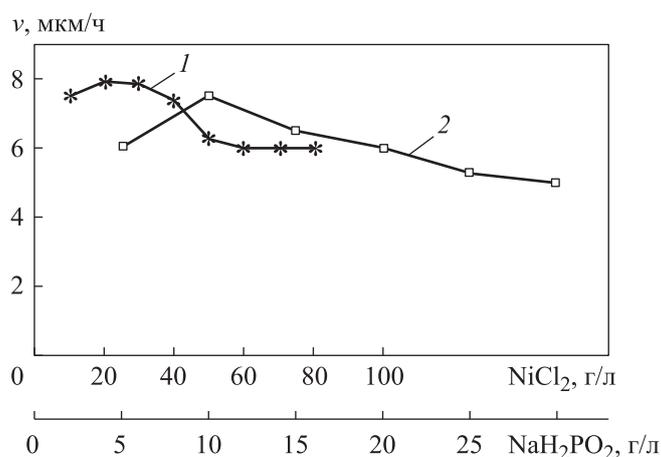


Рис. 1. Влияние процентного содержания хлористого никеля (1) и гипохлорита натрия (2) в растворе на скорость осаждения никель-фосфорного сплава

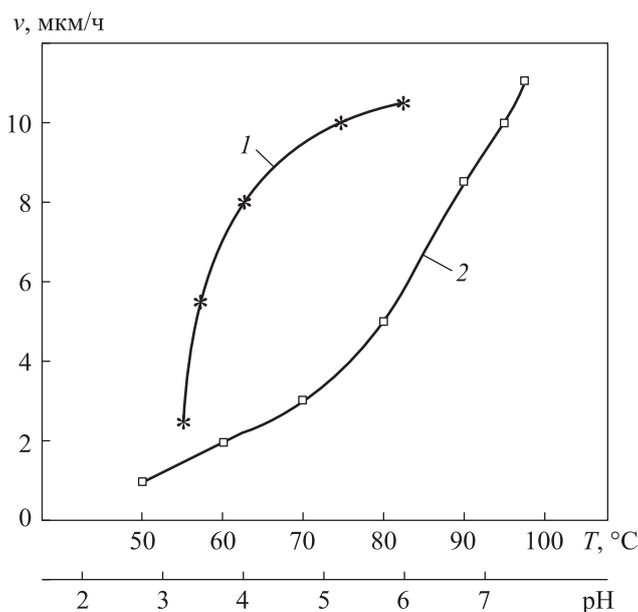


Рис. 2. Зависимость скорости восстановления никеля от pH (1) и температуры (2) раствора при осаждении никель-фосфорного сплава

Определяющим фактором процесса химического никелирования является температура при осаждении раствора. Процентное содержание хлористого никеля в растворе увеличивается с повышением температуры, а при температуре 88...90 °C достигает максимума (см. рис. 2). Значительное влияние на процесс восстановления химического никеля оказывает кислотность раствора. В процессе никелирования происходит самопроизвольное

подкисление раствора. Наилучшие результаты в отношении скорости восстановления никеля и качества покрытия получаются при $pH = 4,5-5,0$ (см. рис. 2) [13–16].

Проведены эксперименты по износостойкости пар трения из алюминиевого сплава Д1Т–Д1Т и Д1Т с никель-фосфорным покрытием, полученных из щелочного раствора и подвергшихся термообработке в течение 1 ч при температуре 200 °С. Микротвердость образца после термообработки соответствовала $H_{\mu} = 1500$ МПа. Толщина никель-фосфорного покрытия составляла 0,1...0,15 мм.

Образцы при испытании базировались и крепились в приспособлении, которое вместе со столом специального устройства совершало возвратно-поступательные движения относительно верхнего образца из алюминиевого сплава Д1Т, действующего силой 2 Н на нижний образец из алюминиевого сплава с никель-фосфорным покрытием. Весовой износ определяли по проявлению основы. Результаты экспериментальных исследований показали, что при применении для смазывания масла марки АМГ-10 износ нижнего алюминиевого образца в паре трения Д1Т–Д1Т с никель-фосфорным покрытием почти в 20 раз меньше, чем при трении с образцом из сплава Д1Т без покрытия [16–18].

Заключение. Проведенные исследования полирования образцов войлочными шлифовальными кругами с нанесенным с помощью клеевой связки на их поверхности абразивным материалом при режимах полирования $v = 20$ м/с, $t = 0,01$ мм, $S = 0,001$ мм/об, $p = 0,18$ МПа позволили получить параметры шероховатости материала основы в диапазоне $Ra = 0,32...0,08$ мкм, что способствовало увеличению прочности сцепления (адгезии) материала основы с никелевым покрытием. Экспериментально установлено, что при увеличении концентрации гипофосфита скорость образования покрытия несколько возрастает. Наилучшие результаты в отношении скорости восстановления никеля и качества покрытия получаются при $pH = 4,5-5,0$. Показано, что покрытия, нанесенные химическим никелированием на образцы, обеспечивают более высокую износостойкость в условиях трения смазочным материалом по сравнению с образцами без покрытия. Равномерность гетерогенного никелевого покрытия очевидно связана с его равномерной мелкокристаллической структурой, которая состоит из частиц правильной формы (ограниченной или округлой) [19].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Скрябин В.А. Физико-механические свойства гальванических хромовых покрытий на стальной основе деталей. *Технология металлов*, 2015, № 10, с. 43–47.
- [2] Скрябин В.А. Формирование поверхностей деталей из алюминиевых сплавов с покрытием никель–рений–фосфор. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2017, № 1, с. 31–37.
- [3] Схиртладзе А.Г., Скрябин В.А., Карасев Н.Я. и др. Совершенствование технологии никелирования деталей из алюминиевых сплавов. *Технология металлов*, 2012, № 8, с. 39–42.
- [4] Скрябин В.А., Схиртладзе А.Г. Технологическое обеспечение качества обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными средами. Старый Оскол, Тонкие наукоемкие технологии, 2015.
- [5] Скрябин В.А. Особенности обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными абразивными средами. *Вестник Мордовского университета*, 2015, т. 25, № 4, с. 72–89.
DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.025.201504.072>
- [6] Мартынов А.Н., Зверовщиков Е.З., Зверовщиков А.Е. и др. Способ камерной обработки свободным абразивом. Патент СССР 1805012. Заявл. 18.10.1990, опубл. 30.03.1993.
- [7] Зверовщиков Е.З., Зверовщиков А.Е. Динамические характеристики уплотненной массы рабочей загрузки при объемной центробежной обработке деталей. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*, 2007, № 1, с. 140–150.
- [8] Зверовщиков А.Е. Многофункциональная центробежно-планетарная обработка. М., Инфра-М, 2013.
- [9] Skryabin V.A. Physicomechanical properties of galvanic chromium coatings on steel parts. *Russ. Metall.*, 2016, vol. 2016, no. 13, pp. 1271–1274.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029516130218>
- [10] Skhirtladze A.G., Skryabin V.A. Technology of repairing abrasive tools. *Russ. Metall.*, 2017, vol. 2017, no. 13, pp. 1176–1181. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029517130249>
- [11] Skryabin V.A. Treatment of products made of polymeric materials. *Polym. Sc. Ser. D*, 2016, vol. 9, no. 3, pp. 331–334. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995421216030229>
- [12] Skryabin V.A., Zverovshchikov A.E., Zotov E.V. Brittle fracture of a material upon microcutting of the workpiece surface by the microrelief protrusions of loose abrasive grains. *Russ. Metall.*, 2018, vol. 2018, no. 13, pp. 1244–1248.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029518130220>
- [13] Скрябин В.А. Изучение физико-механических свойств никель-фосфорных покрытий. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2019, № 1, с. 38–42.
- [14] Skryabin V.A., Skhirtladze A.G. Specific features of turning parts made of polymer materials. *Russ. Metall.*, 2020, vol. 2020, no. 13, pp. 1565–1569.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029520130340>

- [15] Скрябин В.А., Крамченинов И.К. Работоспособность конструкции установки для финишной обработки незакрепленным абразивом среднегабаритных деталей сложного профиля. *Вестник Мордовского университета*, 2017, т. 27, № 4, с. 607–619. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201704.607-619>
- [16] Скрябин В.А. Камерная обработка деталей типа дисков и кулачков. *Вестник Мордовского университета*, 2016, т. 26, № 4, с. 475–489. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.026.201604.475-489>
- [17] Скрябин В.А. Установка для обработки деталей со сложным профилем рабочей поверхности. *Вестник Мордовского университета*, 2018, т. 28, № 4, с. 552–561. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.552-561>
- [18] Схиртладзе А.Г., Тимирязев В.А., Скрябин В.А. Определение износостойкости установочных элементов станочных приспособлений. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*, 2020, № 12, с. 14–18.
- [19] Скрябин В.А., Зверовщиков А.Е. Механизм формирования гетерогенной структуры порошковых инструментальных материалов. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2021, № 1, с. 41–44.

Скрябин Владимир Александрович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» Пензенского государственного университета (Российская Федерация, 440026, г. Пенза, Красная ул., д. 40).

Зверовщиков Александр Евгеньевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и оборудование машиностроения» Пензенского государственного университета (Российская Федерация, 440026, г. Пенза, Красная ул., д. 40).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Скрябин В.А., Зверовщиков А.Е. Технология химического никелирования поверхностей изделий. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2022, № 1 (140), с. 71–81. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-1-71-81>

**CHEMICAL NICKEL PLATING TECHNOLOGY
FOR PRODUCT SURFACES**

V.A. Skryabin

A.E. Zverovshchikov

vs_51@list.ru

azwer@mail.ru

Penza State University, Penza, Russian Federation

Abstract

When studying how a coating influences the wear resistance of details made of aluminum alloys in production conditions, we conducted a multifactorial experiment. The research has been carried out on the application of nickel-phosphorus coating on the surface of parts

Keywords

Nickel-phosphorus coating, processing, planning, experiment, wear resistance

made of aluminum alloys, as well as the pre-finishing treatment under coating. The parameters influencing the rate of nickel-phosphorus alloy deposition and modes of part surface treatment under coating are selected. Experiment planning was carried out, which made it possible to develop optimal modes of deposition and coating composition for obtaining high quality parameters of its surface: roughness and wear-resistance. It has been established that increasing the concentration of hypo-phosphite (sodium salt of alkaline metal and hypophosphorous acid) increases the coating formation rate. Experimental studies on wear resistance of nickel-phosphorus coated and uncoated samples have been conducted. The study shows that nickel-phosphorus coated samples provide higher wear resistance under friction conditions in comparison with uncoated samples, and assumes that the uniformity of heterogeneous coating consisting of nickel and phosphorus is due to the uniform fine crystalline structure consisting of regular shape particles (faceted or rounded). The basic principles of chemical coating technology and mechanical engineering technology are used

Received 12.05.2021

Accepted 06.07.2021

© Author(s), 2022

This work was done within the framework of the project no. 0748-2020-0010 “Scientific principles of heterogeneous structures formation using physical and chemical dispersion methods” (state task of the university in the sphere of scientific activity. Customer is Ministry of Education and Science of the Russian Federation)

REFERENCES

- [1] Skryabin V.A. Studies of physical-mechanical properties of galvanic chromium coatings on steel base of parts. *Tekhnologiya metallov*, 2015, no. 10, pp. 43–47 (in Russ.).
- [2] Skryabin V.A. Formation of part surfaces, made of aluminum alloys with nickel-rhenium-phosphor coating. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All Materials. Encyclopaedic Reference Manual], 2017, no. 1, pp. 31–37 (in Russ.).
- [3] Skhirtladze A.G., Skryabin V.A., Karasev N.Ya., et al. Technology improvement of nickel-plating aluminum alloy parts. *Tekhnologiya metallov*, 2012, no. 8, pp. 39–42 (in Russ.).
- [4] Skryabin V.A., Skhirtladze A.G. Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva obrabotki slozhnoprofil'nykh detaley uplotnennymi melkodispersnymi sredami [Technological quality assurance for processing of complex-profile materials by compacted fine-dispersed media]. *Staryy Oskol, Tonkie naukoemkie tekhnologii Publ.*, 2015.
- [5] Skryabin V.A. Features of intricate-shaped parts by close-settled fine abrasive media. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Mordovia University Bulletin], 2015, vol. 25, no. 4, pp. 72–89 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.025.201504.072>

- [6] Martynov A.N., Zverovshchikov E.Z., Zverovshchikov A.E., et al. Sposob kamernoy obrabotki svobodnym abrazivom [Method of chamber processing with free abrasive]. Patent US 1805012. Appl. 18.10.1990, publ. 30.03.1993 (in Russ.).
- [7] Zverovshchikov E.Z., Zverovshchikov A.E. Dynamic characteristics of workload thickness with volumetric centrifuging part process. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences], 2007, no. 1, pp. 140–150 (in Russ.).
- [8] Zverovshchikov A.E. Mnogofunktsional'naya tsentrobezhno-planetarnaya obrabotka [Multifunctional centrifugal-planetary processing]. Moscow, Infra-M Publ., 2013.
- [9] Skryabin V.A. Physicomechanical properties of galvanic chromium coatings on steel parts. *Russ. Metall.*, 2016, vol. 2016, no. 13, pp. 1271–1274.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029516130218>
- [10] Skhirtladze A.G., Skryabin V.A. Technology of repairing abrasive tools. *Russ. Metall.*, 2017, vol. 2017, no. 13, pp. 1176–1181. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029517130249>
- [11] Skryabin V.A. Treatment of products made of polymeric materials. *Polym. Sc. Ser. D*, 2016, vol. 9, no. 3, pp. 331–334. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995421216030229>
- [12] Skryabin V.A., Zverovshchikov A.E., Zotov E.V. Brittle fracture of a material upon microcutting of the workpiece surface by the microrelief protrusions of loose abrasive grains. *Russ. Metall.*, 2018, vol. 2018, no. 13, pp. 1244–1248.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029518130220>
- [13] Skryabin V.A. Study of physical-mechanical properties of nickel-phosphorus coatings. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All Materials. Encyclopaedic Reference Manual], 2019, no. 1, pp. 38–42 (in Russ.).
- [14] Skryabin V.A., Skhirtladze A.G. Specific features of turning parts made of polymer materials. *Russ. Metall.*, 2020, vol. 2020, no. 13, pp. 1565–1569.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029520130340>
- [15] Skryabin V.A., Kramcheninov I.K. Installation design capacity for finish treatment of complex profile medium size parts by unsupported abrasive. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Mordovia University Bulletin], 2017, vol. 27, no. 4, pp. 607–619 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201704.607-619>
- [16] Skryabin V.A. Chamber treatment process of disks and fists. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Mordovia University Bulletin], 2016, vol. 26, no. 4, pp. 475–489 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.026.201604.475-489>
- [17] Skryabin V.A. The installation for processing of parts with a complex profile of working surface. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Mordovia University Bulletin], 2018, vol. 28, no. 4, pp. 552–561 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.552-561>
- [18] Skhirtladze A.G., Timiryazev V.A., Skryabin V.A. Determination of wear resistance of seat members of machine retaining devices. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2020, no. 12, pp. 14–18 (in Russ.).

[19] Skryabin V.A., Zverovshchikov A.E. Formation mechanism of heterogeneous structure of powder tool materials. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All Materials. Encyclopaedic Reference Manual], 2021, no. 1, pp. 41–44 (in Russ.).

Skryabin V.A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Technologies and Equipment for Mechanical Engineering, Penza State University (Krasnaya ul. 40, Penza, 440026 Russian Federation).

Zverovshchikov A.E. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Technologies and Equipment for Mechanical Engineering, Penza State University (Krasnaya ul. 40, Penza, 440026 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Skryabin V.A., Zverovshchikov A.E. Chemical nickel plating technology for product surfaces. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2022, no. 1 (140), pp. 71–81 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-1-71-81>