

Инновационный подход к созданию композитных покрытий с применением вторичных ресурсов промышленности

© 2026. С. Л. Фукс, к. т. н., доцент,
К. О. Камалов, ст. преподаватель,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: usr00705@vyatsu.ru

Современные промышленные производства, такие как машиностроение и авиастроение, широко используют химические и гальванические покрытия, что приводит к образованию значительных объёмов сточных вод, загрязнённых тяжёлыми металлами, щелочами и кислотами, и создаёт серьёзную экологическую проблему. Для обеспечения экологической безопасности необходимо разработать эффективный метод снижения содержания тяжёлых металлов в окружающей среде. Предлагается использовать концентрированные сточные воды химического никелирования и твёрдые отходы, в частности, золу уноса теплоэлектростанций, превращая их в ценный компонент для создания композитного покрытия. Актуальность разработки обусловлена последовательностью получения дисперсной фазы взаимодействием золы уноса с жидким отходом химического никелирования и использованием её в композитных покрытиях. В процессе обработки золы уноса в отработанных растворах химического никелирования осуществляется активация, сопровождающаяся образованием металлических частиц никеля на её поверхности. Целью исследования является получение композитного покрытия никель–зола уноса с использованием мелкодисперсной фракции золы уноса. Полученная дисперсная фаза (ДФ) вводится в электролиты электрохимического никелирования, формируя композитное электрохимическое покрытие (КЭП) никель–(активированная) зола уноса. Композиционные покрытия демонстрируют повышение микротвёрдости, снижение внутренних напряжений и повышение износостойкости по сравнению с традиционными никелевыми покрытиями. Полученные результаты позволяют повторно использовать промышленные отходы, сократить экологическую нагрузку и улучшить эксплуатационные характеристики композитных покрытий.

Ключевые слова: зола уноса, никелирование, композиционные материалы, покрытие, микротвёрдость.

An innovative approach to the composite coatings creation using industrial waste resources

© 2026. S. L. Fuchs ORCID: 0000-0002-9238-0000
K. O. Kamalov ORCID: 0000-0002-5347-4643
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: usr00705@vyatsu.ru

Environmental hazard of machinery production and aircraft industry can be reduced by reutilization of electrolytes for deposition of composite electrochemical coatings with enhanced physical properties. Specifically, composites consisting of the nickel matrix and dispersed phase can be obtained. The dispersed phase consists of micro- and nanoparticles which improves coating appearance and enhances performance parameters. Fly ash is formed during the combustion of solid fuel in the Thermal Power Plant (TPP). It is promising as dispersed phase because it consists of spherical particles of various diameters. The fly ash activation in the disposal solution of chemical-nickel plating causes an increase in particle size and weight due to the reduction of nickel over the particle surface and in agglomerates. The TPP-5 (Kirov, Russian Federation) fly ash is used in this study to obtain “nickel-activated fly ash” composite electrochemical coatings (CEC). The introduction of the fly ash coated with chemically-deposited nickel into the matrix obtained by electrochemical plating of nickel is shown to form the CEC with improved wear resistance due to the reduction of internal stresses and the absence of delamination. Dispersed particles embedded into the nickel matrix change its morphology and mechanical characteristics of the coating without changing the appearance. The obtained results demonstrate that the most promising combination for obtaining CEC is the following: the disposal nickel-plating electrolyte containing nickel-coated magnetic fraction of the fly ash with the particle size below 125 µm. The application of the disposal nickel-plating electrolyte solution with a low nickel concentration for fly ash activation makes liquid waste processing easier and cheaper.

Keywords: fly ash, nickel plating, composite materials, coating, microhardness.

Для получения современных качественных изделий широкое применение в машиностроении, авиастроении и других отраслях промышленности нашли химические и гальванические покрытия. В результате деятельности производств, наряду с совершенствованием технологий, образуются многотоннажные сточные воды и твёрдые отходы, загрязняющие поверхностные водные объекты и территории солями тяжёлых металлов (ТМ), щелочами и кислотами. При утилизации больших объёмов жидких отходов гальванических производств необходимы специальные установки для их переработки и реагенты для осаждения ТМ.

Для изготовления изделий специального назначения применяется химическое осаждение никеля из разбавленных растворов солей никеля и восстановителя. В то же время, для обеспечения коррозионной стойкости поверхности изделий используется гальваническое никелевое покрытие, наносимое из концентрированных растворов.

Снижение экологической опасности производств возможно в результате повторного применения электролитов для получения композиционных покрытий металла с новыми физическими свойствами. К ним относятся композиты, состоящие из никелевой матрицы и твёрдой дисперсной фазы (ДФ). Дисперсная фаза, состоящая из микро- и наночастиц различных химических веществ, служит для улучшения эксплуатационных характеристик покрытий, что расширяет диапазон использования этих материалов [1].

В качестве ДФ используются вещества без изменения химического состава: оксид алюминия, оксид кремния, графит, а также продукт процесса сжигания твёрдого топлива в котлах электростанций – зола уноса.

Для получения матрицы композита применяются отработанные электролиты с изменённым составом. К ним относятся никельсодержащие растворы, потерявшие часть технологических свойств и подлежащие утилизации.

Технологии переработки жидких отходов, содержащих ТМ, описаны в работах [2–6]. В работе [2] показано, что извлечение ионов ТМ из сточных вод, шламов и отработанных технологических растворов промышленных предприятий объясняется необходимостью защиты окружающей среды, а также ценностью этих металлов. Процесс переработки растворов является малоизученным и затратным. Авторами работ [3–5] разработаны условия очистки никельсодержащих сточных вод

и извлечения солей никеля из этих растворов. Установлено, что эффективным способом является регенерация отработанных растворов [6]. Извлечённый никель можно применять при нанесении на металлическую поверхность композиционного электрохимического покрытия, повышающего механические свойства поверхности изделий [7–9]. Оптимальным методом утилизации раствора никелирования является выделение никеля на металлическом катоде [10]. Применение золы уноса в качестве ДФ при получении композиционного электрохимического покрытия является одним из способов её утилизации [11–15].

В соответствии с данными о лимитирующих признаках вредности (ЛПВ), никель токсичен для водных объектов рыбохозяйственного назначения, для которых $ПДК_{р.х.} = 0,01 \text{ мг/дм}^3$, класс опасности 3. С учётом этих характеристик разработка условий повторного использования растворов, содержащих соли никеля, является актуальной задачей.

В связи с этим целью исследования являлось получение композитного покрытия никель–зола уноса с использованием мелкодисперсной фракции золы уноса.

Объекты и методы исследования

При сжигании твёрдого топлива в котельном агрегате теплоэлектростанций (ТЭЦ) с отходящим дымовым газом удаляется мелкодисперсный минеральный остаток – зола уноса. Разделение частиц золы уноса на фракции осуществлялось на виброгрохоте (ВИБРОТЕХНИК, Россия) с размером ячеек сит от 1200 до 90 мкм. В полученных фракциях золы уноса определялись магнитная и немагнитная составляющие с использованием постоянных магнитов, последующей промывкой водой от растворимых примесей, фильтрацией и сушкой в термостате (СНОЛ, Россия) при температуре 105 °С. Для взвешивания золы уноса, компонентов при приготовлении растворов и образцов металлов до и после нанесения покрытий применялись электронные весы марки ViBRA HT (Россия). С целью изучения морфологии поверхности частиц и её состава использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) со встроенным детектором энергодисперсионного анализа (ЭДА) марки JSM-6510LV (JEOL, Япония). При определении микротвёрдости применялся металлографический микроскоп марки ПМТ-3М. Аналитический контроль состава

никельсодержащих растворов осуществлялся комплексонометрическим методом.

Для нанесения никеля на поверхность латунных изделий использовался раствор химического никелирования, приготовленный из реактивов марки ч.д.а. путём растворения в дистиллированной воде сульфата никеля $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 25–30 г/дм³, с добавлением уксусной кислоты CH_3COOH 4,4–5 г/дм³, буферной добавки ацетата натрия CH_3COONa 13 г/дм³ (для поддержания величины рН 4,0–4,5) и гипофосфита натрия $\text{Na}(\text{H}_2\text{PO}_2)$ 15 г/дм³ для восстановления никеля по реакции: $\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}^0$. Процесс протекал при температуре 95 °С в течение 1 ч. В отработанном растворе химического никелирования содержание Ni^{2+} снижалось до 4–5 г/дм³, образовывался фосфит натрия $\text{Na}_2(\text{HPO}_3)$, и повышалась кислотность до рН 3,5–3,7. После добавления в отработанный раствор 7,5 г/дм³ $\text{Na}(\text{H}_2\text{PO}_2)$ осуществлялась обработка частиц золы уноса, образующейся на Кировской ТЭЦ-5. Активирование золы уноса проводилось в течение 1 ч при 90–95 °С и перемешивании 50 г золы уноса с размером частиц 85–24 мкм в растворе объёмом 0,5 дм³. Обработанная зола уноса промывалась дистиллированной водой, высушивалась до постоянной массы, взвешивалась и использовалась при получении композиционного электрохимического покрытия (КЭП).

Композиционное электрохимическое покрытие никель–зола уноса наносилось на поверхность стальных образцов из электролита блестящего никелирования состава: сульфат никеля $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 280 г/дм³, хлорид никеля $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 45 г/дм³, борная кислота H_3BO_3 – 30 г/дм³, сахарин – 1 г/дм³. Режим электролиза: рН 3,5–4,5, плотность тока (D_k) – 2–3 А/дм², температура процесса 50 °С, перемешивание в течение 0,33–3,00 ч. Масса активированной золы уноса в электролите составляла 67–100 г/дм³. Химическое никелирование осуществлялось на образцах латуни марки Л85, а электрохимическое никелирование и КЭП никель–активированная зола уноса в виде дисперсной фазы (ДФ) – на образцах стали марки 45ХН2МФА. Электрохимическая ячейка объёмом 0,8 дм³ состояла из двух никелевых анодов, расположенных у стенок, и стального катода площадью 1 дм² в центре электролизёра.

Результаты и обсуждение

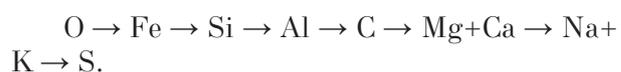
В верхнее сито виброгрохота с максимальным размером ячеек загружалось 500 г

золы уноса. При грохочении последовательно остающиеся на нижних ситах частицы уменьшались в размерах до величины менее 90 мкм. Фракционный состав золы уноса ТЭЦ-5 (г. Киров) представлен в таблице 1. Погрешность определений масс фракций составляла ± 3 %.

Результаты исследований, полученных с использованием СЭМ, представлены на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что зола уноса преимущественно состоит из сфер различного диаметра и формы, на некоторых сферах имеются отверстия. Это характерно для ценосфер, формирующихся при охлаждении расплава солей и оксидов металлов, находящихся в золе. Средний элементный состав золы уноса, полученный при обработке по результатам расшифровки шести спектров, представлен в таблице 2.

Оказалось, что содержание элементов в золе уноса уменьшается в ряду:



Высокое содержание кислорода связано с присутствием оксидов металлов, находящихся в золе уноса. Наличие небольшого количества серы характерно для гипса – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Значительное количество железа в золе уноса образуется в результате газовой коррозии стальных стенок топки котла при температурах горения угольной пыли (1100–1400 °С). Кремний находится в виде оксида кремния. Другие примеси также состоят из оксидов и силикатов [16, 17].

По разности масс до и после никелирования определялось количество никеля на частицах золы уноса. Результаты химического никелирования поверхности частиц золы уноса представлены в таблице 3. Погрешность определения содержания никеля в растворе составляла ±0,002 г/дм³.

За счёт осаждения никеля на поверхности частиц золы уноса происходит увеличение её массы и кислотности раствора.

Результаты морфологических исследований частиц золы уноса, активированных никелем, представлены на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что при обработке частиц золы уноса в отходе раствора химического никелирования происходит активное восстановление ионов Ni^{2+} до Ni^0 , что подтверждается появлением металлического блеска (рис. 2а). При контакте с нагретым до 90 °С кислым раствором никелирования не-

Таблица 1 / Table 1

Фракционный состав золы уноса ТЭЦ-5 / Thermal power plant fly ash fractional composition

Размер частиц фракций, мкм Fraction particle size, μm	Масса фракции, г Fraction weight, g	Разделение на составляющие, г Division into components, g	
		немагнитная non-magnetic	магнитная magnetic
1200	6,05	6,00	0,05
450	329,54	206,00	123,54
315	162,52	95,76	66,76
125	0,07	0,07	0,00
90	0,53	0,53	0,00
< 90	1,52	1,49	0,03
Итого / Total	500,23	309,85	190,38

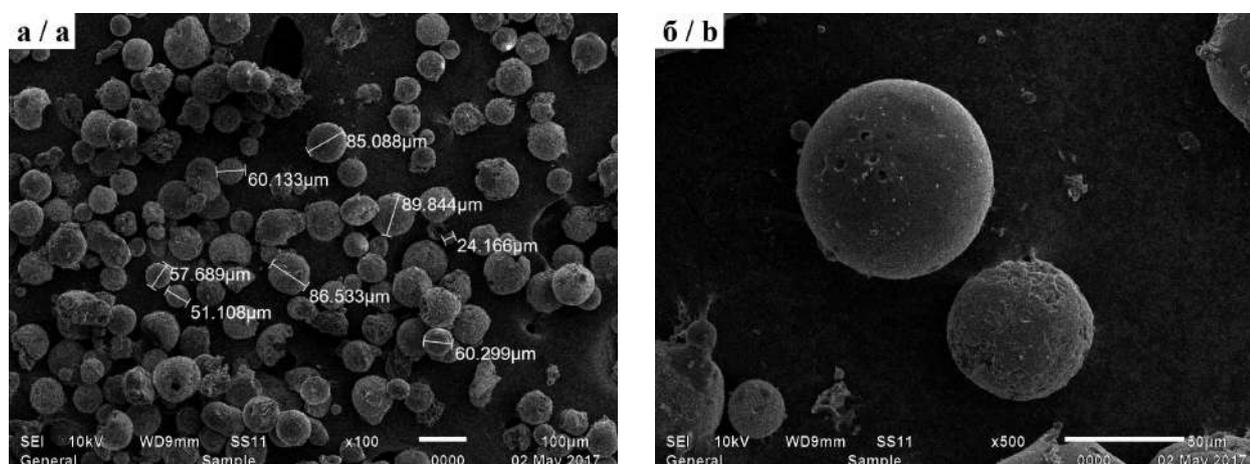


Рис. 1. Морфология золы уноса (90 и < 90 мкм): а – ×100, б – ×1000
Fig. 1. Fly ash particles morphology (90 and < 90 μm): а – ×100, б – ×1000

Таблица 2 / Table 2

Элементный состав золы уноса ТЭЦ-5 / Elemental composition of Thermal power plant fly ash

Сумма / The amount	Элемент, масс. % / Element, wt. %							
	C	O	Fe	Si	Al	Mg + Ca	Na + K	S
100	7,46	39,42	21,99	17,34	7,98	3,29	1,97	0,55

Таблица 3 / Table 3

Химическое никелирование поверхности частиц золы уноса
Chemical nickel plating of the fly ash particles

Масса Ni в золе уноса, г Ni weight in fly ash, g	Уменьшение [Ni ²⁺] в растворе, г/дм ³ [Ni ²⁺] reduction in solution, g/dm ³	ΔрН	Цвет частиц золы уноса Fly ash particles' color
0,4554	3,166	0,6	светло-серый / light grey
0,4917	0,591	0,8	
0,7979	3,228	1,10	серый / grey
0,8412	2,054	0,90	
0,6466	2,260	0,85	

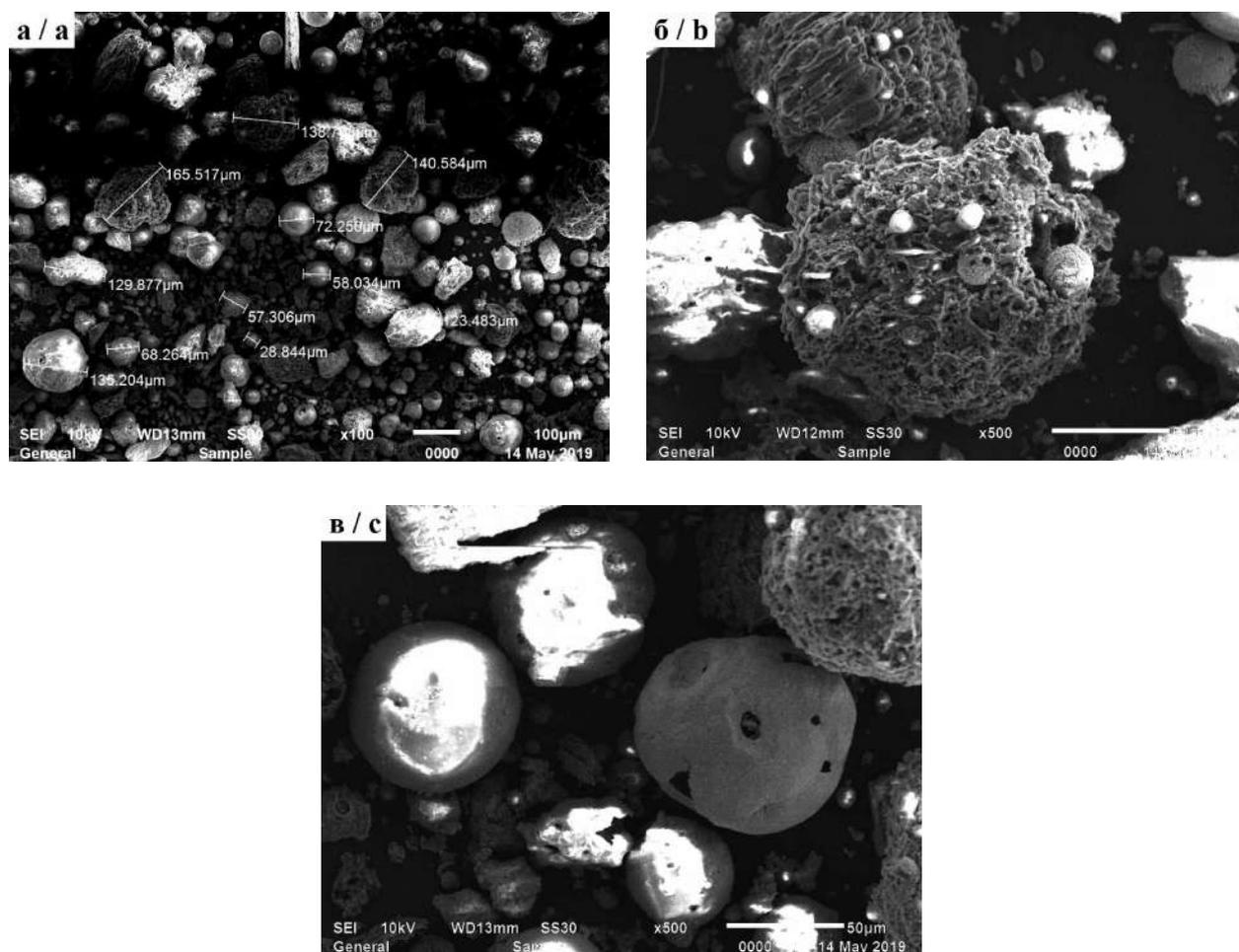


Рис. 2. Морфология золы уноса после обработки раствором химического никелирования (28–125 мкм): а – ×100, б – ×500, в – ×500
Fig. 2. Fly ash particles' morphology after treatment with a chemical nickel plating solution (28–125 µm): а – ×100, б – ×500, в – ×500

Таблица 4 / Table 4

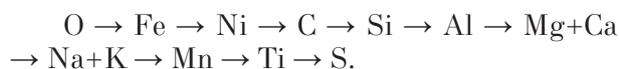
Элементный состав активированной никелем золы уноса / Nickel-activated fly ash composition

Сумма The amount	Элемент, масс. % / Element, wt. %										
	C	O	Fe	Ni	Si	Al	Mg+Ca	Mn	Na+K	Ti	S
100	20,77	32,58	21,99	12,07	6,46	3,12	1,63	0,56	0,52	0,19	0,11

которые ценосферы разрушаются (рис. 2б, в) и на вновь образованной поверхности также происходит восстановление никеля.

Средний элементный состав, активированный никелем золы уноса, определённый по расшифровке шести спектров, представлен в таблице 4.

Результаты обработки спектров, полученных энергодисперсионным анализом, показали, что содержание элементов в золе уноса, обработанной раствором химического никелирования, уменьшается в ряду:



Содержание никеля на поверхности частиц золы уноса составляет 12,07 %. Присутствие щелочных, щёлочноземельных металлов, алюминия снижается более чем в 2 раза, что обусловлено их переходом в нагретый до 50 °С раствор никелирования. При толщине КЭП никель–зола уноса 3,3–4,0 мкм содержание ДФ максимально и составляет 38 %. Затем наблюдается снижение содержания ДФ в покрытии, а при толщине КЭП никель–зола уноса 10–16 мкм вновь возрастает, оставаясь постоянным, 32 %.

Блестящие покрытия металлических изделий должны иметь декоративный вид и повышенную износостойкость. Однако при

длительном использовании прочность сцепления с поверхностью снижается, образуются трещины, сколы и отслоения. Это характерно для покрытий, толщиной 15 мкм и выше [18]. Активированная никелем зола уноса обладает химическим сродством к никелевому покрытию, получаемому электрохимическим способом. Следовательно, её можно применять в качестве ДФ, а в качестве матрицы использовать блестящее никелевое покрытие.

На стали при плотности тока 2 А/дм², времени электролиза 2 ч и постоянном перемешивании получены КЭП никель–зола уноса, толщиной 44,7 мкм. Морфология блестящего никелевого покрытия и КЭП никель–зола уноса, полученных при катодной плотности тока 2 А/дм², приведена на рисунке 3.

При увеличении ×1000 электрохимическое никелевое покрытие равномерное блестящее, имеет внутренние напряжения растяжения, в результате которых на поверхности наблюдаются микротрещины в виде белых полос от механических воздействий при промывке и последующей сушке образца (рис. 3а), в то время как на плоскости образца, покрытого КЭП никель–зола уноса, имеются выпуклости и углубления с заметными неравномерно рас-

положенными частицами золы уноса (рис. 3б). При этом внутренние напряжения растяжения отсутствуют, блеск покрытия сохраняется. Визуальные наблюдения показали также, что КЭП никель–зола уноса имеет неглубокий питтинг (тёмные точки) по границам зёрен. Характеристики электрохимического осаждения никеля при плотности тока 3 А/дм² приведены в таблице 5.

При времени проведения электролиза до 50 мин выход по току никеля возрастает до 97,9 %. Снижение выхода по току никеля с увеличением времени электролиза обусловлено уменьшением содержания ионов никеля в приэлектродном слое электролита [18]. Результаты определения микротвёрдости никелевого покрытия и КЭП никель–зола уноса в зависимости от толщины приведены на рисунке 4.

Полученные данные свидетельствуют о том, что с увеличением толщины никелевого покрытия на стальной подложке в 2,25 раза микротвёрдость возрастает на 25 %, затем снижается, и при толщине 22–27 мкм остаётся постоянной – 0, 216 Н/мкм².

Частицы активированной золы уноса электропроводны и легко осаждаются на ме-

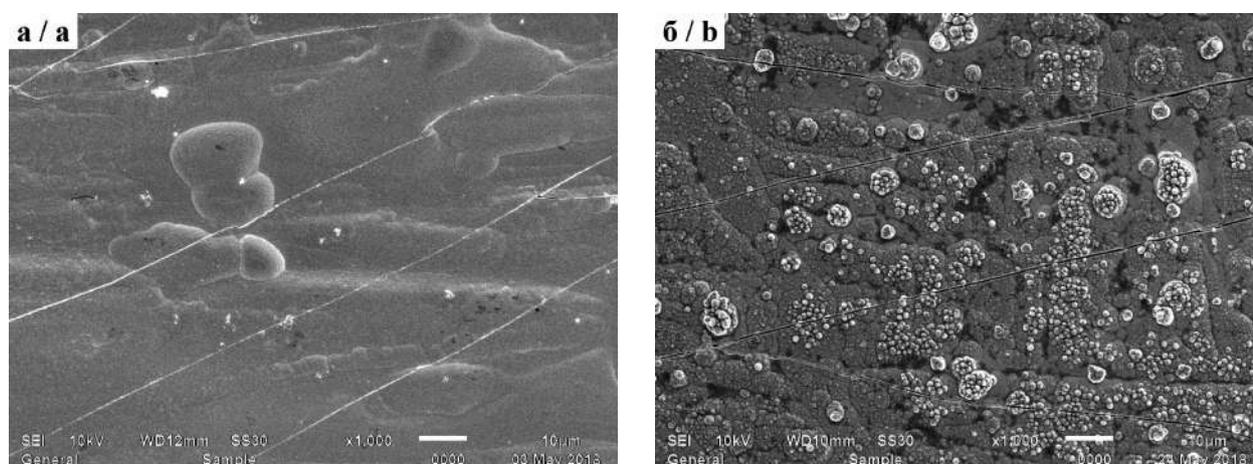


Рис. 3. Морфология блестящего никелевого покрытия (а) и КЭП никель–зола уноса (б). Увеличение ×1000. $D_c = 2 \text{ А/дм}^2$. Толщина 44,7 мкм
Fig. 3. Morphology of the shiny nickel coating (a) and the nickel–fly ash composite electrochemical coating (b). Magnification ×1000. $D_c = 2 \text{ А/дм}^2$. Thickness 44.7 µm

Таблица 5 / Table 5

Характеристики процесса никелирования / Nickel plating characteristics

Время электролиза, мин Electrolysis time, min	Выход по току никеля, % Nickel current output, %
35	90,0 ± 0,3
40	97,0 ± 0,4
50	97,9 ± 0,4
120	96,0 ± 0,3

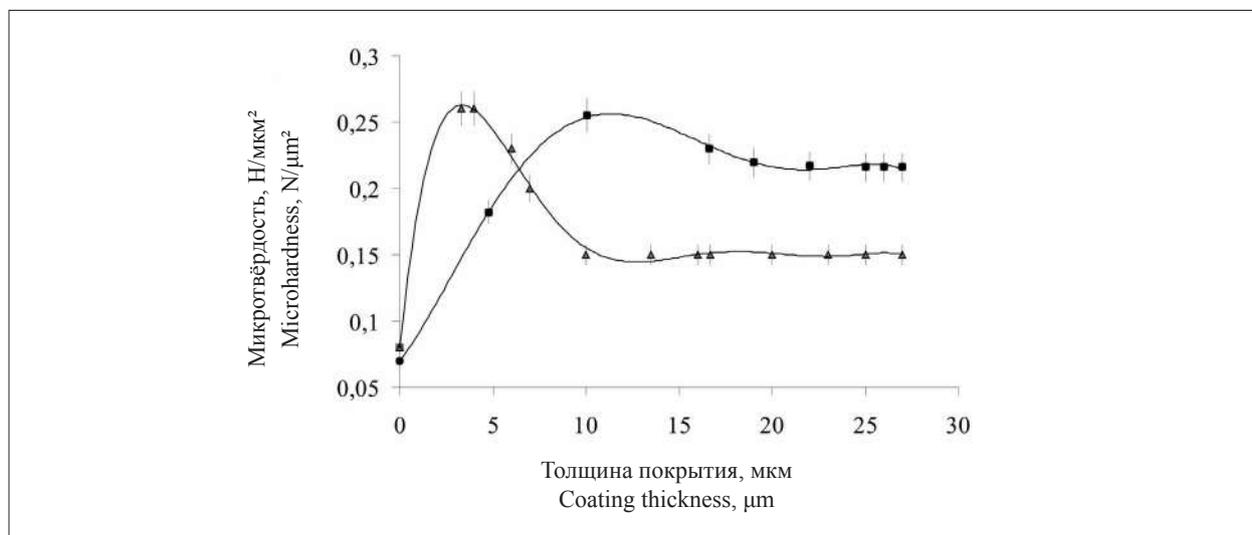


Рис. 4. Зависимость микротвёрдости от толщины никелевого покрытия (●) и КЭП никель–зола уноса (▲)
Fig. 4. Dependence of microhardness on the thickness of the nickel coating (●) and the nickel–fly ash composite electrochemical coating (▲)

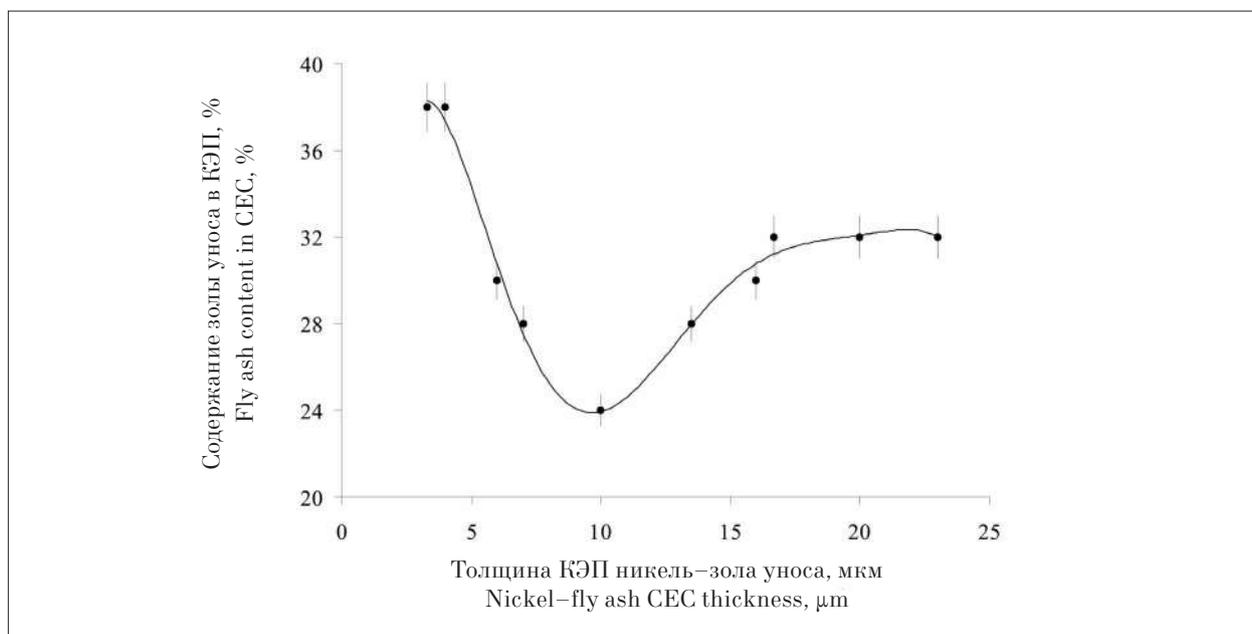


Рис. 5. Зависимость содержания дисперсной фазы в КЭП никель–зола уноса от толщины покрытия
Fig. 5. Dependence of the content of the dispersed phase in the nickel–fly ash composite electrochemical coating (CEC) on the coating thickness

таллической поверхности. При электролизе на активированных частицах золы уноса, находящейся в контакте с поверхностью стального катода, восстановление Ni^{2+} из электролита происходит с той же скоростью [19]. Отсюда следует, что на поверхности стального катода в начале электролиза формируется плотный слой ДФ, покрытый никелем и обладающий повышенной микротвёрдостью.

На рисунке 5 приведены результаты определений содержания ДФ в композитном

электрохимическом покрытии никель–зола уноса. Можно отметить, что в КЭП никель–зола уноса при толщине 3,3–4,0 мкм содержание ДФ максимально и составляет 38 %. Затем наблюдается резкое падение содержания ДФ в покрытии, при толщине КЭП никель–зола уноса 10–16 мкм оно вновь возрастает до содержания 24–30 % и при 16,7–23 мкм остаётся постоянным – 32 % [20]. При изгибе пластины, покрытой КЭП никель–зола уноса, образование микротрещин не наблюдается

вследствие снижения внутренних напряжений. Шелушение и отслаивание также отсутствуют, увеличивая износостойкость изделий.

Заключение

Анализ литературных сведений показал, что снижение экологической опасности машиностроительных и авиастроительных производств может быть достигнуто при повторном использовании электролитов для получения композиционных покрытий с новыми физическими свойствами. К ним относятся композиты, состоящие из никелевой матрицы и дисперсной фазы, состоящей из микро- и наночастиц различных химических веществ, что улучшает внешний вид КЭП и повышает эксплуатационные характеристики.

Установлено, что активированная в отработанном растворе химического никелирования зола уноса характеризуется изменением окраски, что обусловлено восстановлением никеля равномерно по поверхности частиц.

Показано, что при внедрении в матрицу, полученную электрохимическим осаждением никеля и дисперсной фазы в виде золы уноса, покрытой слоем химически осаждённого никеля, образуется КЭП никель–зола уноса. Это приводит к снижению внутренних напряжений в покрытии, отсутствию шелушения и отслаивания, что увеличивает износостойкость изделий.

Присутствие в никелевой матрице частиц дисперсной фазы в виде активированной никелем золы уноса изменяет текстуру матрицы и механические характеристики без изменения внешнего вида.

На основании результатов по получению КЭП никель–зола уноса можно рекомендовать отработанный электролит никелирования с добавкой магнитной фракции золы уноса размером 125 мкм и ниже, покрытой слоем никеля, для нанесения твёрдых износостойких покрытий в паре механизма вал–ступица. Снижение содержания никеля в отработанных растворах химического никелирования позволяет упростить и сократить процессы очистки и утилизации, что ведёт к уменьшению затрат на реагенты, снижению расхода воды и энергии.

Разработанный состав электролита для нанесения КЭП никель–зола уноса, приготовленный с использованием отходов теплоэлектростанций, может применяться также для нанесения блестящего никелевого покрытия, так как не содержит, кроме золы уноса, никаких других примесей.

Таким образом, применение отработанного раствора химического никелирования для активации золы уноса представляет инновационный подход к утилизации промышленных отходов и созданию новых покрытий с улучшенными характеристиками.

Литература

1. Сайфуллин Р.С. Неорганические композиционные материалы. М.: Химия, 1983. 300 с.
2. Губин А.Ф., Гусев В.Ю., Чистякова Н.В. Экологические аспекты решения проблем утилизации электролитов химического никелирования // Пути и средства повышения экологической безопасности гальванических производств: тез. докл. науч.-техн. семинара. М.: РХТУ, 1994. С. 43.
3. Бушковский А.Л., Кармадонов Л.Н., Бордунов В.В. Способ очистки сточных вод от никеля // Патент RU 2010012 С1. Заявление: 5005020/26, 10.09.1991. Дата публикации: 30.03.1994.
4. Шумилова М.А., Суксин Н.Е. Отработанный раствор химического никелирования – ресурс для получения новых продуктов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 131–136. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-131-136
5. Хазель М.Ю., Лют Петер, Зародин Г.С. Способ извлечения никеля из отработанных растворов гальванических производств // Патент RU 2125105 С1. Заявление: 96123204/02, 16.12.1996. Дата публикации: 20.01.1999.
6. Шумилова М.А., Суксин Н.Е. Регенерационная утилизация отработанных растворов химического никелирования // Химическая физика и мезоскопия. 2023. Т. 25. № 2. С. 262–270. doi: 10.15350/17270529.2023.2.24
7. Svyatokhina V.P., Isaeva O.Yu., Pestrikov S.V., Krasnogorskaya N.N. Estimation of efficiency of removal of heavy metal ions as hydroxides from sewage // Russ. J. Appl. Chem. 2003. V. 76. P. 320–322. doi: 10.1023/A:1024683519586
8. Чепрасова В.И., Залыгина О.С. Отработанные электролиты никелирования как вторичный сырьевой ресурс // Природные ресурсы. 2017. № 2. С. 126–133.
9. Андреева Н.Н., Любимова Я.С., Черник А.А., Кругликова Е.С. Интенсификация процесса утилизации отработанного раствора химического никелирования // Гальванотехника и обработка поверхности. 2017. Т. 25. № 2. С. 48–50. doi: 10.47188/0869-5326-2017-25-2-48
10. Кенжалиев Б.К., Беркинбаева А.Н., Досымбаева З.Д., Шарипов Р.Х., Сулейменов Э.Н. Изменение параметров водных растворов в процессе электрохимического выщелачивания вторичного сырья с применением серографитового электрода // Комплексное использование минерального сырья. 2016. № 1. С. 66–70.
11. Кунилова И.В., Крылов И.О. К вопросу комплексной переработки золы сжигания каменных углей предприятий теплоэлектроэнергетики // Технологии

переработки отходов с получением новой продукции: материалы V Всерос. науч.-практ. конф. Киров: Вятский государственный университет, 2023. С. 11–15.

12. Khoshnoud P., Abu-Zahra N. Kinetics of thermal decomposition of PVC/Fly ash composites // *Int. J. Polym. Anal. Charact.* 2017. V. 23. No. 2. P. 170–180. doi: 10.1080/1023666X.2017.1404668

13. Hue N.V., Phong N.N., Hanh P.H. Effects of sodium lauryl sulfate on co-electrodeposition of nickel and fly ash particles // *Int. J. Innov. Eng. Technol. (IJJET)*. 2017. V. 8. No. 3. P. 289–295. doi: 10.21172/ijiet.83.036

14. Ramesh C.S., Seshadri S.K., Iyer K.J.L. Wear resistance of nickel-fly ash composite coatings // *Wear*. 1991. V. 145. No. 1. P. 189–195. doi: 10.1016/0043-1648(91)90247-R

15. Li H., Dai M., Dai S., Dong X., Li F. Methylene blue adsorption properties of mechanochemistry modified coal fly ash // *Hum. Ecol. Risk Assess.: Int. J.* 2018. V. 24. No. 8. P. 2133–2141. doi: 10.1080/10807039.2018.1440527

16. Akinyemi S.A., Gitari W.M., Petrik L.F., Nyakuma B.B., Hower J.C., Ward C.R., Oliveira M.L.S., Silva L.F.O. Environmental evaluation and nano-mineralogical study of fresh and unsaturated weathered coal fly ashes // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 663. P. 177–188. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.308

17. Silva L.F.O., DaBoit K., Serra C., Mardon S.M., Hower J.C. Fullerenes and metallofullerenes in coal-fired stocker fly ash // *Coal Combustion and Gasification Products*. 2010. V. 2. P. 66–79. doi: 10.4177/CCGP-D-10-00007.1

18. Лайнер В.И., Кудрявцев Н.Т. Основы гальваностегии. Ч. 1. М.: Металлургиздат, 1953. 624 с.

19. Sudagar J., Lian J., Sha W. Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings – a critical review // *J. Alloys Compound*. 2013. V. 571. P. 183–204. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.03.107

20. Сайфуллин Р.С., Хацринов А.И., Водопьянова С.В., Мингазова Г.Г., Фомина Р.Е. Исследования в области создания композиционных электрохимических покрытий (КЭП) с дисперсной фазой микро- и наночастиц // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2009. № 6. С. 80–90.

References

1. Saifullin R.S. *Inorganic composite materials*. Moskva: Chemistry, 1983. 300 p. (in Russian).

2. Gubin A.F., Gusev V.Yu., Chistyakova N.V. Environmental aspects of solving the problems of recycling chemical nickel plating electrolytes // *Ways and means of improving the environmental safety of electroplating production: abstracts of the scientific and technical seminar*. Moskva: RKhTU, 1994. P. 43 (in Russian).

3. Bushkovskij A.L., Karmadonov L.N., Bordunov V.V. Method of sewage treatment from nickel // *Patent RU 2010012 C1*. Application: 5005020/26, 09.10.1991. Date of publication: 30.03.1994 (in Russian).

4. Shumilova M.A., Suksin N.E. The spent solution of chemical nickel plating is a resource for obtaining new products // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 131–136 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-131-136

5. Khazel M.Ju., Ljut Peter, Zarodin G.S. Method of nickel recovery from sheet solutions of electroplating // *Patent RU 2125105 C1*. Application: 96123204/02, 12.16.1996. Date of publication: 20.01.1999 (in Russian).

6. Shumilova M.A., Suksin N.E. Regeneration disposal waste solutions of chemical nickel plating // *Chemical physics and mesoscopy*. 2023. V. 25. No. 2. P. 262–270 (in Russian). doi: 10.15350/17270529.2023.2.24

7. Svyatokhina V.P., Isaeva O.Yu., Pestrikov S.V., Krasnogorskaya N.N. Estimation of efficiency of removal of heavy metal ions as hydroxides from sewage // *Russ. J. Appl. Chem.* 2003. V. 76. P. 320–322. doi: 10.1023/A:1024683519586

8. Cheprasova V.I., Zalygina O.S. Spent nickel plating electrolytes as a secondary raw material resource // *Natural Resources*. 2017. No. 2. P. 126–133 (in Russian).

9. Andreeva N.N., Lyubimova Ya.S., Chernik A.A., Kruglikova E.S. Intensification of the process of utilization of spent chemical nickel plating solution // *Electroplating and surface treatment*. 2017. V. 25. No. 2. P. 48–50 (in Russian). doi: 10.47188/0869-5326-2017-25-2-48

10. Kenzhaliyev B.K., Berkinbayeva A.N., Dosymbayeva Z.D., Sharipov R.Kh., Suleimenov E.N. The change in the parameters of the aqueous solutions during the electrochemical leaching of the secondary raw materials by using sulfur-graphite electrode // *Complex use of mineral resources*. 2016. No. 1. P. 66–70 (in Russian).

11. Kunilova I.V., Krylov I.O. On the issue of integrated processing of coal ash from thermal power plants // *Waste processing technologies to produce new products: materialy V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Киров: Vyatka State University, 2023. P. 11–15 (in Russian).

12. Khoshnoud P., Abu-Zahra N. Kinetics of thermal decomposition of PVC/Fly ash composites // *Int. J. Polym. Anal. Charact.* 2017. V. 23. No. 2. P. 170–180. doi: 10.1080/1023666X.2017.1404668

13. Hue N.V., Phong N.N., Hanh P.H. Effects of sodium lauryl sulfate on co-electrodeposition of nickel and fly ash particles // *Int. J. Innov. Eng. Technol. (IJJET)*. 2017. V. 8. No. 3. P. 289–295. doi: 10.21172/ijiet.83.036

14. Ramesh C.S., Seshadri S.K., Iyer K.J.L. Wear resistance of nickel-fly ash composite coatings // *Wear*. 1991. V. 145. No. 1. P. 189–195. doi: 10.1016/0043-1648(91)90247-R

15. Li H., Dai M., Dai S., Dong X., Li F. Methylene blue adsorption properties of mechanochemistry modified coal fly ash // *Hum. Ecol. Risk Assess.: Int. J.* 2018. V. 24. No. 8. P. 2133–2141. doi: 10.1080/10807039.2018.1440527

16. Akinyemi S.A., Gitari W.M., Petrik L.F., Nyakuma B.B., Hower J.C., Ward C.R., Oliveira M.L.S., Silva L.F.O. Environmental evaluation and nano-mineral-

ogical study of fresh and unsaturated weathered coal fly ashes // Sci. Total Environ. 2019. V. 663. P. 177–188. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.308

17. Silva L.F.O., DaBoit K., Serra C., Mardon S.M., Hower J.C. Fullerenes and metallofullerenes in coal-fired stocker fly ash // Coal Combustion and Gasification Products. 2010. V. 2. P. 66–79. doi: 10.4177/CCGP-D-10-00007.1

18. Layner V.I., Kudryavtsev N.T. Fundamentals of galvanostegia. V. 1. Moskva: Metallurgizdat, 1953. 624 p. (in Russian).

19. Sudagar J., Lian J., Sha W. Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings – a critical review // J. Alloys Compound. 2013. V. 571. P. 183–204. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.03.107

20. Sayfullin R.S., Khatsrinov A.I., Vodopyanova S.V., Mingazova G.G., Fomina R.E. Research in the field of creation of composite electrochemical coatings (CEC) with a dispersed phase of micro- and nanoparticles // Herald of Kazan Technological University. 2020. No. 6. P. 80–90 (in Russian).

**Приглашаем принять участие в работе
III Международной научно-практической конференции
«Экология родного края: проблемы и пути их решения»
г. Киров, 22–23 апреля 2026 г.**

Основные научные направления работы конференции:

1. Экологические проблемы регионов, пути решения.
2. Экологический мониторинг состояния окружающей среды.
3. Химия и экология почв.
4. Химия и экология микроорганизмов.
5. Биология и экология растений.
6. Химия природного сырья и контроль качества фармсубстанций.
7. Биология и экология животных.
8. Социальная экология и здоровье.
9. Отходы производства и потребления: экологические аспекты.
10. Экологическое образование и воспитание.

Организаторы конференции: Вятский государственный университет, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, Ляонинский институт науки и технологии.

Контакты: <http://envjournal.ru/ecolab/knf.php>

e-mail: confbioeco@gmail.com

Тел. 8(8332)37-02-77