

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №5 (131). С. 39-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №5 (131). P. 39-48.

Научная статья
УДК 621.793/66.097.5
doi: 10.30987/2223-4608-2022-5-39-48

Исследование влияния отжига на свойства и структуру каталитического носителя на основе системы Ni-Al-Al₂O₃ на металлической подложке, полученного методом холодного газодинамического напыления

Надежда Витальевна Яковлева¹, инженер 1 категории,
Борис Владимирович Фармаковский², к.т.н.,
Александр Михайлович Макаров³, инженер 2 категории,
Михаил Владимирович Старицын⁴, инженер 3 категории
^{1,2,3,4} НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия
^{1,2,3,4} npk3@crism.ru

Аннотация. Описано исследование влияния состава исходной порошковой композиции на удельную площадь поверхности и изменение микроструктуры, фазового состава и толщины покрытий при нагреве.

Ключевые слова: пористое покрытие, носитель катализатора, холодное газодинамическое напыление, интерметаллидные соединения, оксид алюминия, алюминид никеля

Благодарности: экспериментальные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием «Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования – соглашение № 13.ЦКП.21.0014 (075-11-2021-068). Уникальный идентификационный номер – RF-2296.61321X0014.

Для цитирования: Яковлева Н.В., Фармаковский Б.В., Макаров А.М., Старицын М.В. Исследование влияния отжига на свойства и структуру каталитического носителя на основе системы Ni-Al-Al₂O₃ на металлической подложке, полученного методом холодного газодинамического напыления // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №5 (131). – С. 39-48. doi: 10.30987/2223-4608-2022-5-39-48.

Original article

Study of negative hardening effect on the properties and structure of the catalytic carrier based on a Ni-Al-Al₂O₃ system on a metal substrate obtained by cold gas dynamic coating

Nadezhda V. Yakovleva¹, 1-st rank engineer,
Boris V. Farmakovskiy², Cand. Sc. Tech.,
Alexander M. Makarov³, 2-nd rank engineer,
Mikhail V. Staritsyn⁴, 3-rd rank engineer

^{1,2,3,4} SIC «Kurchatov Institute» — Central Research Institute of KM «Prometheus», St. Petersburg, Russia
^{1,2,3,4} npk3@crism.ru

Annotation. The study of the effect of baseline porulent composition formulation on the specific surface area and changes in the microtexture, phase composition and thickness of coatings when healed, is described.

Keywords: porous coating, catalyst carrier, cold gas dynamic coating, inter-metallic compounds, aluminum oxide, nickel aluminide

Acknowledgements: experimental studies were carried out on the equipment of the core facilities center «Composition, structure and properties of structural and functional materials of the Kurchatov Institute» – Central Research Institute of KM «Prometheus» with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education – Agreement No. 13.CCP.21.0014 (075-11-021-068). The unique identification number is RF-2296.61321X0014.

For citation: Yakovleva N.V., Farmakovskiy B.V., Makarov A.M., Staritsyn M.V. Study of negative hardening effect on the properties and structure of the catalytic carrier based on a Ni-Al-Al₂O₃ system on a metal substrate obtained by cold gas dynamic coating. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.5 (131), pp. 32-48. doi: 10.30987/2223-4608-2022-5-39-48.

Введение

Каталитические реакторы с композиционным каталитическим слоем на металлической основе имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными трубчатыми реакторами с набивным каталитическим слоем. К числу этих преимуществ относятся более высокая механическая прочность и теплопроводность, меньшая тепловая инерция и меньший вес, что особенно привлекательно при использовании для преобразования углеводородного топлива в обогащённое водородом горючее [1 – 4]. Данные покрытия могут быть использованы в качестве носителя катализатора для систем конверсии на транспорте и на автономных энергоустановках на топливных элементах для снабжения электроэнергией и горячей водой [5, 6].

Основные требования к каталитическим покрытиям на стальной подложке сводятся к обеспечению высокой пористости, когезионной и адгезионной прочности и сорбционной способности удерживать атомы активных металлов переходных групп. Эти требования могут быть удовлетворены композиционными покрытиями, нанесёнными методом холодного газодинамического напыления (ХГДН), исходная порошковая смесь которых состоит из порошков пластичных металлов и керамики [7].

В качестве металлических составляющих выбраны никель и алюминий. Согласно [8] при напылении Ni на металлическую поверхность методом ХГДН формируется качественное покрытие с адгезионной связью со сталью. В свою очередь Al обладает более высокой теплопроводностью, чем большинство металлов широко применяемых в промышленности. Его введение будет повышать теплопроводность покрытия, что особенно важно для конверторов, в которых используются теплопередающие поверхности с катализатором. В ра-

боте [9] установлено, что повышению когезионной прочности покрытий ХГДН также способствует введение в исходную смесь порошков различных металлов. В связи с этим в настоящей работе были исследованы покрытия, полученные напылением смесей порошков никеля, алюминия и керамики с разным соотношением содержания порошков Ni и Al в исходной композиции.

Для выполнения функции каталитического носителя покрытие должно обладать достаточной пористостью. Внимание привлёк гидроксид алюминия Al(OH)₃, который при нагреве выше 450 °С разлагается с выделением водяного пара под большим давлением, что способно привести к растрескиванию микроструктуры покрытия и, следовательно, повысить пористость.

При напылении методом ХГДН смеси порошков никеля, алюминия и гидроксида алюминия частицы керамики будут внедряться в слой напыленного металла и удерживаться в нём. Отжиг образцов с покрытием вызовет разрыхление напыленного слоя с одновременным превращением Al(OH)₃ в оксиды α- и γ- Al₂O₃. Последний оксид согласно [10] способствует повышению удельной площади поверхности покрытия.

Актуальной задачей является комплексное исследование свойств каталитического носителя, полученного методом ХГДН. В статье приведены результаты исследований влияния состава исходной порошковой композиции на величину удельной площади поверхности и изменений структуры, фазового состава и толщины покрытий под воздействием отжига.

Материалы и методы

Состав взвешенных приготовленных исходных порошковых композиций, которые были использованы для получения покрытий методом ХГДН, представлен в табл. 1.

1. Состав исходных порошковых смесей на основе системы Ni-Al-Al(OH)₃

Образец	Соотношение Ni/Al	Содержание, % масс.		
		Ni	Al	Al(OH) ₃
Ni17Al33Al(OH) ₃ 50	0,5	17,2	33,4	49,8
Ni25Al25Al(OH) ₃ 50	1	24,8	25,6	49,5
Ni33Al17Al(OH) ₃ 50	2	32,5	18,3	50,2

Для более четкого установления влияния каждого из металлических компонентов на свойства покрытий были изготовлены 3 порошковые смеси с различным соотношением Ni и Al: 0,5, 1 и 2. Содержание Al(OH)₃ было фиксировано для всех составов и составляло 50 %.

Кроме составов, перечисленных в табл. 1, для определения влияния отжига на удельную площадь поверхности покрытий были дополнительно изготовлены порошковые смеси с соотношением содержания Ni/Al = 0,5, 1 и 2, в которых содержание Al(OH)₃ составляло от 10 до 70 %.

В качестве основы для напыления использовалась металлическая лента толщиной 100 мкм из ферритной стали марки X15Ю5.

Напыление исходных порошковых смесей производилось на установке холодного газодинамического напыления «Димет-403» при следующем режиме: давление в камере 7 атм., максимальная температура в камере 800 °С, скорость транспортирующего газа (воздуха) 600 м/с, расход порошкового материала 1...5 г/с, расстояние от сопла до подложки 10 мм.

Напыленное методом ХГДН покрытие имеет волнистую форму переменной толщины, с вершинами и впадинами. Измерения толщины покрытий производили на оптическом микроскопе Leica DM-2500 на микрошлифах, приготовленных таким образом, чтобы их плоскости проходили через вершины и впадины покрытия и поперек волн.

Термическая обработка покрытий в виде отжига, который необходим для дегидратации Al(OH)₃ и разрыхления структуры производился в электропечи SNOL 30/1100. Температура отжига была установлена по результатам термогравиметрического анализа.

Термический анализ проводился с помощью устройства совмещенного термогравиметрического анализа и дифференциально-сканирующей калориметрии TGA/DSC 1/1600 HF, Меттлер Толедо. Динамические эксперименты выполнялись в интервале температур от 25 до 1000 °С при скорости нагрева 20 К/мин. Для определения фазового состава

порошковых смесей и покрытий использовался дифрактометр Bruker D8 ADVANCE. Рентгенографирование осуществлялось в фильтрованном CuK_{α1} – излучении.

Исследование микроструктуры покрытий производилось на оптическом микроскопе Leica DM-2500. Карты распределения элементов были получены на растровом электронном микроскопе Tescan Vega III, оснащенный приставкой рентгеноспектрального микроанализа.

Измерения удельной площади поверхности осуществлялись на анализаторе Tristar 3020 методом низкотемпературной сорбции азота. Расчёт производился по пятиточечному методу БЭТ. Для удаления влаги и загрязнений перед измерениями образцы подвергались дегазации в вакууме и инертном газе.

Результаты

Для обоснования выбора режима термической обработки покрытий ХГДН системы Ni-Al-Al(OH)₃ и уточнения температуры образования интерметаллидных соединений были получены ТГА/ДСК кривые на образцах с различным содержанием Ni и Al при одинаковом содержании Al(OH)₃ равным 50 %.

Видно (рис. 1), что независимо от содержания Ni и Al характер кривых для трех составов покрытий одинаков.

Обращает внимание заметно более низкая интенсивность реакций фазовых превращений в покрытиях с соотношением Ni/Al = 2 по сравнению с покрытиями с этим соотношением равным 0,5 и 1.

Многоступенчатый процесс дегидратации Al(OH)₃ отчетливо проявляется на кривой ТГА в виде протяженного спада веса покрытий начиная с температуры 218 °С и заканчивая 552 °С последовательно проходят реакции удаления кристаллизованной воды, выделение из гидроксида бемита AlO(OH) и разложение бемита на γ-Al₂O₃ и водяной пар [11]. Подъем кривых ТГА выше 600 °С обязан окислению стальной подложки и металлических порошков на воздухе.

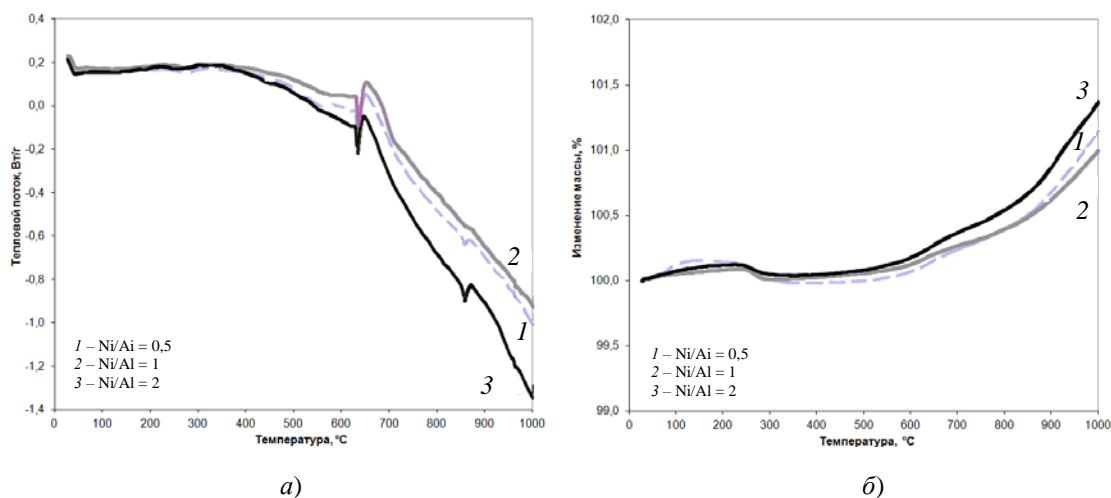


Рис. 1. Результаты термического анализа для покрытий с 50 % Al(OH)₃ и с различным соотношением Ni/Al: а – ДСК-кривая; б – ТГА-кривая

Выше температуры 550 °C начинается экзотермические процессы, вызванные выделением интерметаллидов системы Ni-Al и окислением подложки и металлических составляющих покрытий. Резкий эндотермический пик переходящий в экзотермический пик при температурах 630...650 °C связан с плавлением Al и интенсивным выделением интерметаллидов. Кривые ДСК в покрытиях с соотношением Ni/Al = 0,5 и 1 заканчиваются эндотермическими пиками при температуре 840 °C отражающими реакции образования интерметаллидов системы Ni-Al с более высокой температурой формирования.

Учитывая завершение процесса дегидратации Al(OH)₃ и частичное выделение интерметаллидов была принята температура отжига покрытий ХГДН равная 650 °C.

Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что состав покрытий после отжига при температуре 650 °C включает в себя как вещества исходных порошковых смесей, такие как Al, Ni, α-Al₂O₃, так и вещества сформировавшиеся в процессе отжига при 650 °C γ-Al₂O₃, NiAl₃, Ni₂Al₃, NiO.

При исследовании изменений микроструктуры (рис. 2) покрытий ХГДН, вызванных термической обработкой, было выявлено 2 вида повреждений: разрыхление материала покрытий вследствие образования микротрещин и пор, а также осыпание верхнего слоя покрытий под действием высокого давления водяного пара при разложении гидроксида Al(OH)₃.

Эти виды повреждений оказывают противоположное воздействие на толщину покрытий: разрыхление способствует росту толщи-

ны, а осыпание верхнего слоя приводит к ее уменьшению.

Представление о стойкости покрытий разного состава можно получить из сравнения разницы толщины покрытий до и после отжига. Кривые распределения толщины покрытий трех групп до и после отжига приведены на рис. 3.

Анализ формы кривых показывает, что под влиянием нагрева при температуре выше 650 °C толщина покрытий становится менее однородной.

Основная тенденция всех составов покрытий является распухание, что приводит к повышению толщины покрытий. Лишь на образцах покрытий с соотношением содержания Ni/Al = 0,5 наблюдались случаи уменьшения толщины вследствие значительного осыпания покрытия при отжиге.

На рис. 4 представлены карты распределения элементов в поперечном сечении покрытий до и после отжига при температуре 650 °C в течение 1 ч.

На снимках образцов в неотоженном состоянии присутствуют компоненты исходных порошковых композиций Ni и Al, а также продукт разложения гидроксида γ-Al₂O₃. В картах распределения перечисленных компонентов по сечению покрытия с соотношением содержания Ni/Al = 1 и 2 отмечается неравномерность распределения Al и Ni, а именно частицы Ni преимущественно концентрируются в слое, прилегающем к стальной подложке, и частицы Al располагаются в верхнем и среднем слоях покрытий.

Отжиг образцов вызывает фазовые превращения гидроксида Al(OH)₃ в оксид γ-Al₂O₃.

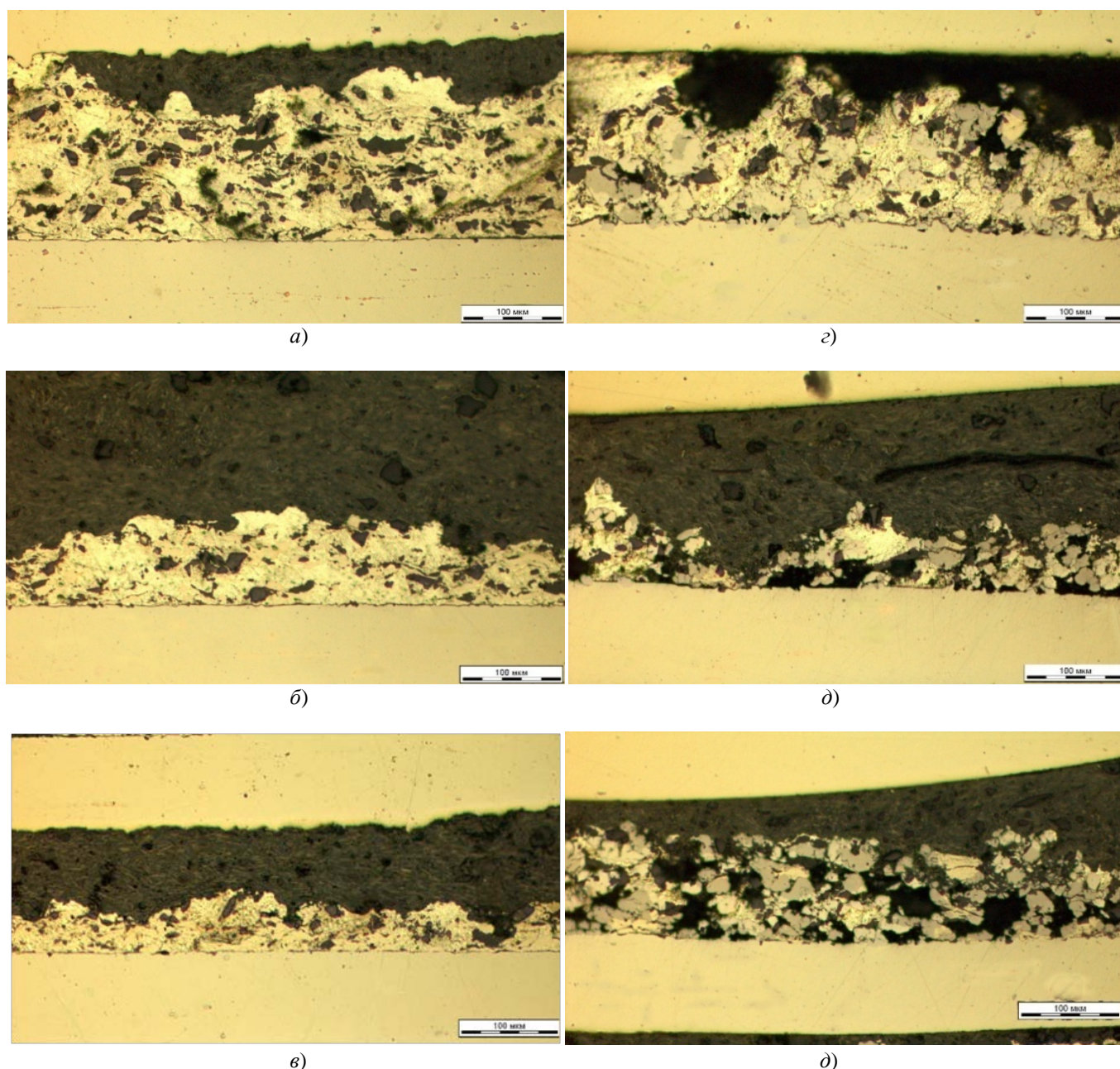


Рис. 2. Микроструктура поперечного сечения покрытий $Ni_{17}Al_{33}Al(OH)_3_{50}$, $Ni_{25}Al_{25}Al(OH)_3_{50}$, $Ni_{33}Al_{17}Al(OH)_3_{50}$ до отжига (а, б, в) и после отжига (з, д, е) соответственно

Концентрация интерметаллидов максимальна в покрытиях с соотношением содержания $Ni/Al = 2$. Меньше всего интерметаллидов в покрытиях с соотношением содержания $Ni/Al = 1$.

На изображениях крупных частиц Ni наблюдается неполное формирование интерметаллида в поверхностном слое частицы. Это свидетельствует в пользу протекания реакции как результата диффузии Al в Ni .

На снимках покрытий с соотношением содержания $Ni/Al = 0,5$ и 1 видны крупные выросты на поверхности стали X15Ю5. Красный цвет выростов отражает их оксидное проис-

хождение, как результат окисления стали при предварительном отжиге заготовок подложки на воздухе по режиму $900\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ ч}$.

Одним из определяющих параметров оценки качества каталитических покрытий является удельная площадь поверхности. На рис. 5 представлен график зависимости этой характеристики от содержания гидроксида $Al(OH)_3$ в исходной порошковой смеси.

Величина удельной площади поверхности покрытий в исходном состоянии достаточно низкая не превышает $1,5\text{ м}^2/\text{г}$ и слабо зависит от содержания гидроксида.

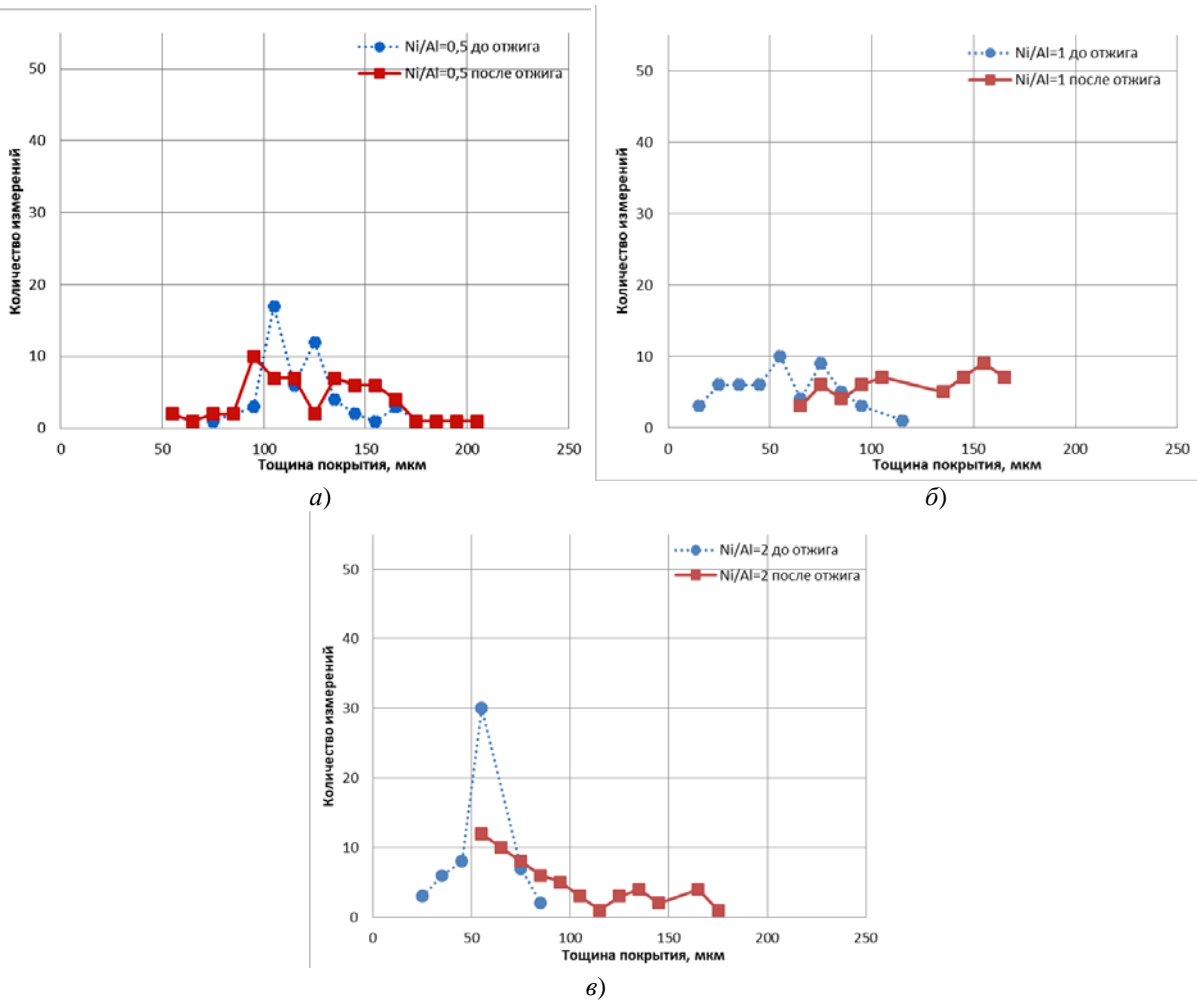
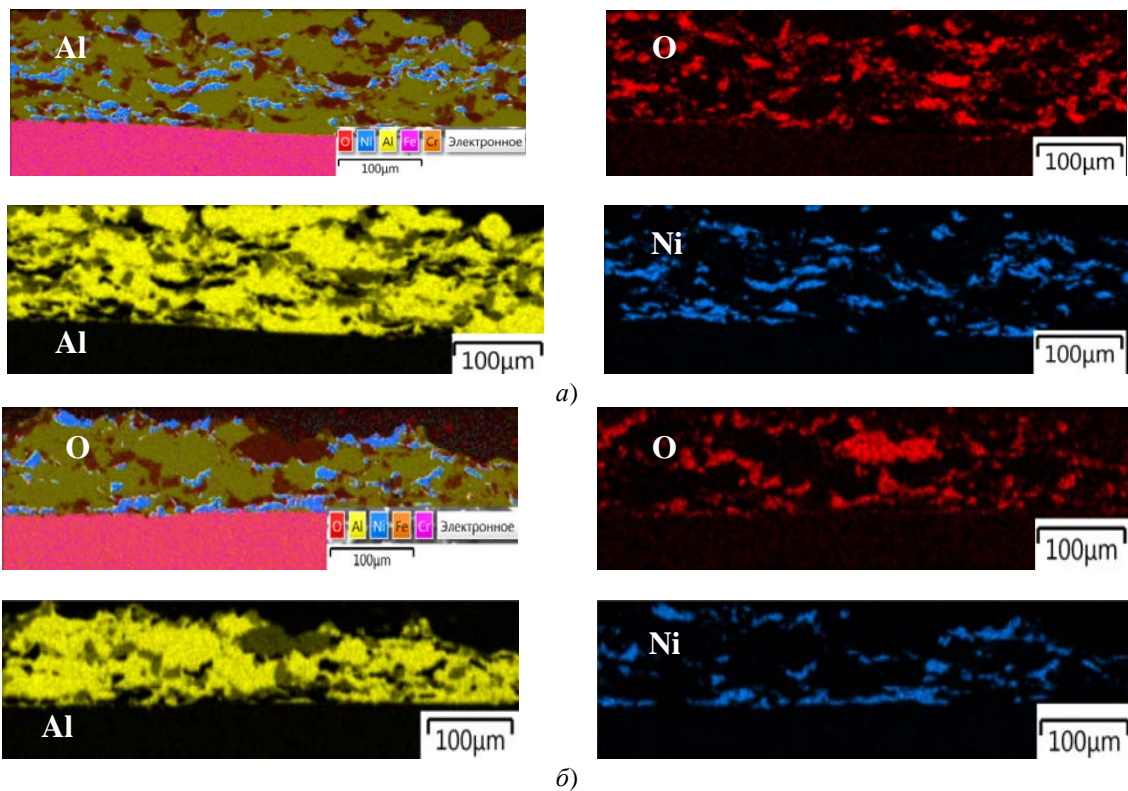


Рис. 3. Влияние отжига на толщину покрытий:

а – Ni17Al33Al(OH)₃50; б – Ni25Al25Al(OH)₃50; в – Ni33Al17Al(OH)₃50



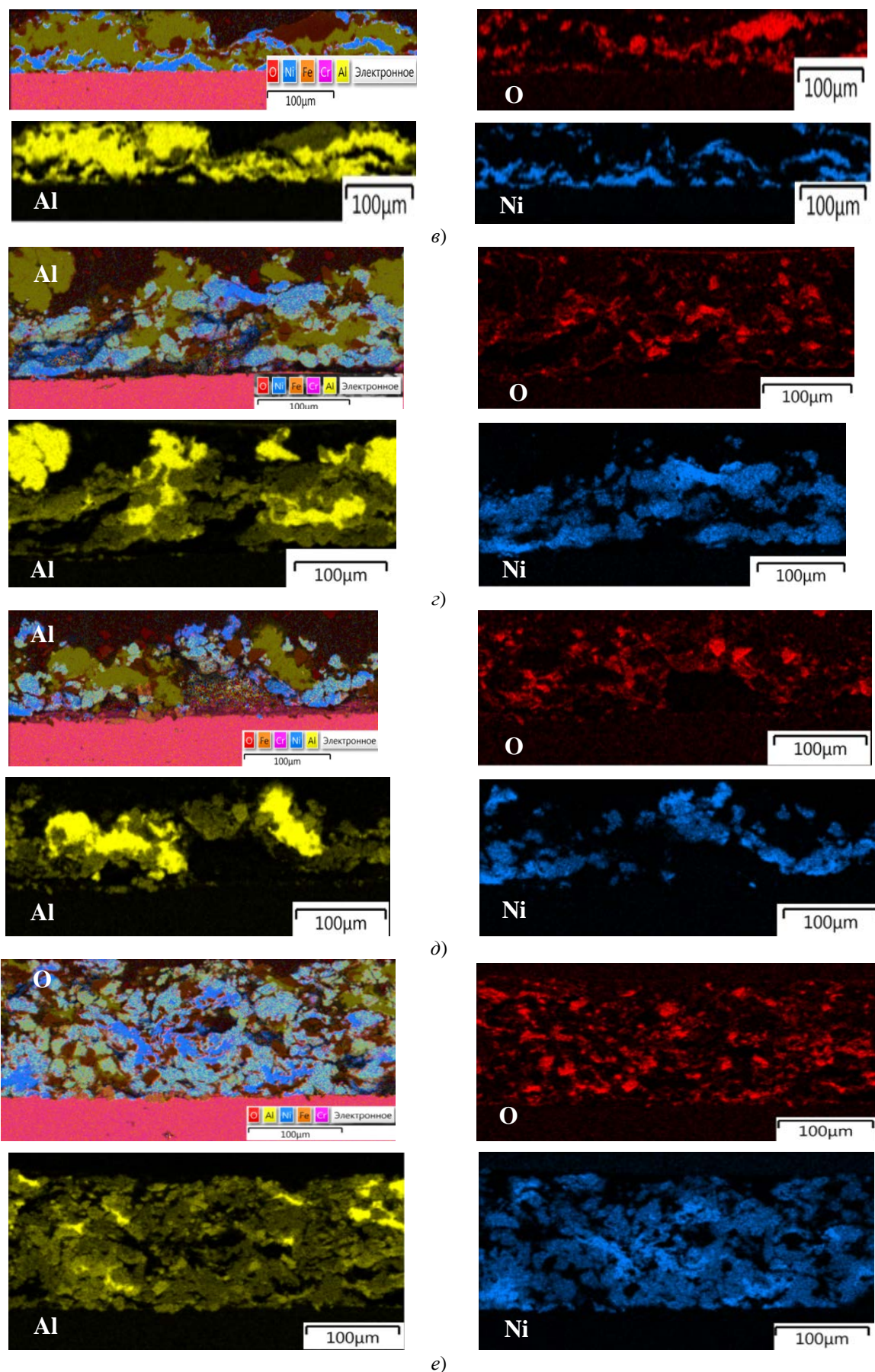


Рис. 4. Карта распределения элементов в поперечном сечении покрытий $Ni_{17}Al_{33}Al(OH)_{3,50}$, $Ni_{25}Al_{25}Al(OH)_{3,50}$, $Ni_{33}Al_{17}Al(OH)_{3,50}$ до отжига (а, б, в) и после отжига (г, д, е) соответственно

Отжиг образцов с покрытием при температуре 650 °С сопровождается дегидратацией и разрыхлением структуры, что приводит к резкому росту удельной площади поверхности до значений 5...7 м²/г и появлению пиков удельной площади поверхности в диапазоне содержания 40...55 % Al(OH)₃ в исходной порош-

ковой композиции.

Формирование пиков вызвано действием конкурирующих факторов: ростом содержания в покрытии пористого гидроксида алюминия и снижением толщины покрытий из-за ослабления металлической связи внутри покрытия.

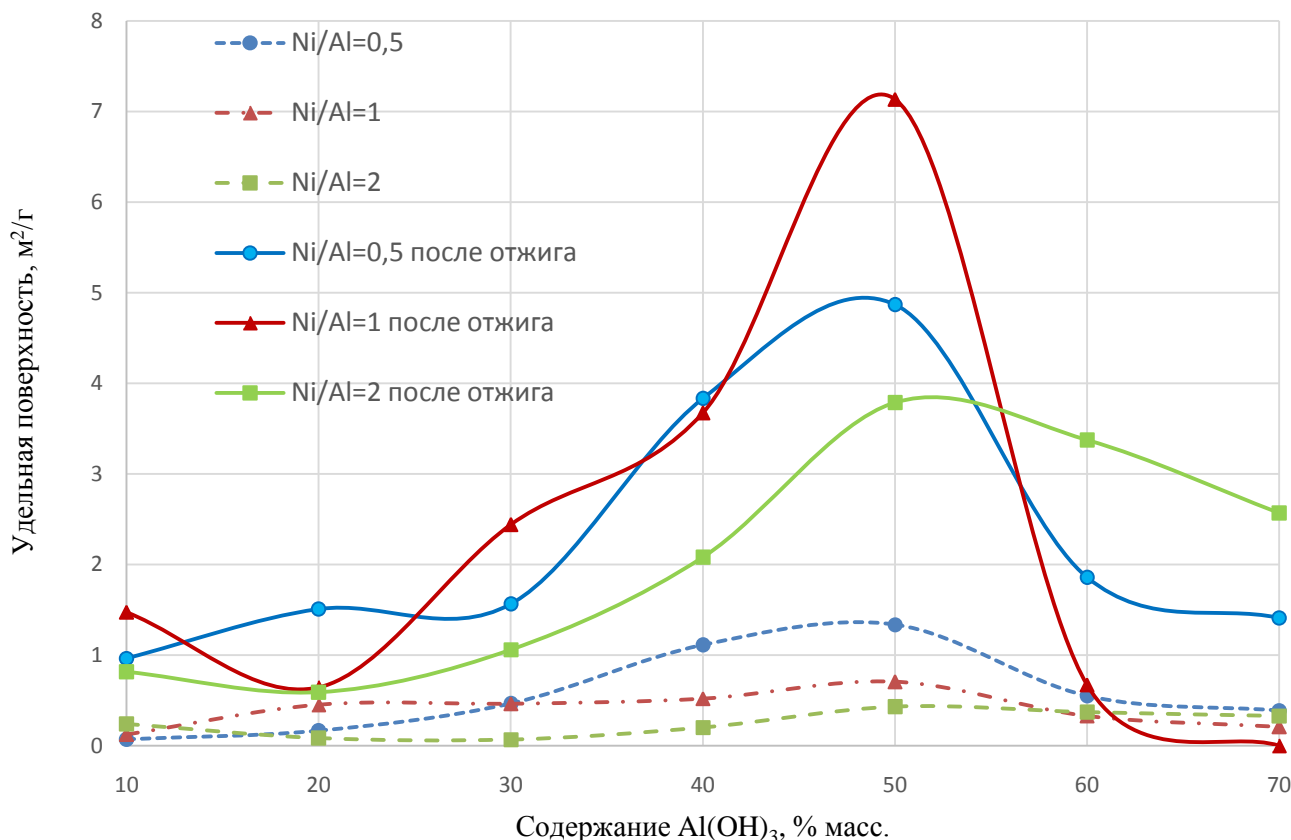


Рис. 5. Влияние отжига на удельную площадь поверхности покрытий с различным соотношением Ni и Al и Al(OH)₃ в исходной порошковой смеси

Заключение

Композиционные каталитические покрытия системы Ni-Al-Al₂O₃ на подложке из ферритной стали марки X15Ю5 были изготовлены с использованием двухступенчатой технологии, включающей нанесение покрытий методом холодного газодинамического напыления и отжига при температуре 650 °С. Для повышения пористости в порошковую композицию вводили порошок гидроксида алюминия Al(OH)₃, который при отжиге подвергался дегидратации с выделением Al₂O₃ и водяного пара под высоким давлением.

Исследовали влияние содержания керамического компонента Al(OH)₃ и соотношения содержания металлических порошков Ni и Al в исходной порошковой смеси с соотношением содержания Ni/Al = 0,5, 1 и 2 на изменения

микроструктуры, фазового состава и величины удельной площади поверхности при нагреве во время отжига. Под воздействием высокого давления пара при отжиге в покрытиях развиваются 2 типа повреждений: разрыхление структуры из-за образования пор и микротрещин и осыпания поверхностного слоя покрытий. Разрыхление структуры сопровождается увеличением толщины покрытий, а осыпание приводит к утонению покрытий и образованию углублений в покрытиях, обеспечивая доступ реагентов вплоть до стальной подложки.

Отжиг сопровождается изменением фазового состава покрытий. При дегидратации Al(OH)₃ выделяется оксид γ-Al₂O₃. Нагрев до температуры выше 550 °С обеспечивает образование интерметаллидов NiAl₃ и Ni₂Al₃ в местах соприкосновения частиц Al и Ni.

Методом низкотемпературной сорбции измерена удельная площадь поверхности покрытий до и после отжига. Показано, что в результате разрыхления структуры и изменения поверхностного рельефа при осыпании величина удельной площади поверхности после отжига возрастает в 8 – 10 раз. Наибольшими значениями удельной площади поверхности обладали покрытия с соотношением содержания Ni/Al = 1.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Preparation** of Pt/ γ -Al₂O₃ catalyst coating in microreactors for catalytic methane combustion/ L. He, Y. Fan, L. Luo et.al. // *Chemical Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 380, P. 122424.
2. **Dry Methane Reforming Performance** of Ni-based catalyst coated onto stainless steel substrate / S. Sangsonga, M. Phongaksorna, S. Tungkamaniam et.al. // *Energy Procedia*. – 2015. – Vol. 79, pp. 137-142.
3. **Kramer, M., Watson, M., McKelvie, M.**, Additive Manufacturing of Catalyst Substrates for Steam-Methane Reforming // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2018. – Vol. 27. – No. 1. – pp. 21-31.
4. **Milt, V.G., Ivanova, S., Sanz, O., Domínguez, M.I.** Au/TiO₂ supported on ferritic stainless steel monoliths as CO oxidation catalysts // *Applied Surface Science*. – 2013. – Vol. 270. – pp. 169-177.
5. **Govender, S., Friebich, H.B.** Monoliths: A Review of the basics, preparation methods and their relevance to oxidation // *Catalysts*. – 2017. – Vol. 7. – No. 2. – p. 62.
6. **Alphonse, P., Ansart, F.** Catalytic coatings on steel for low-temperature propane prereforming to solid oxide fuel cell (SOFC) application // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2009. – Vol. 336. – No. 2. – PP. 658-666.
7. **Козлов, И.А., Лещев, К.А., Никифоров, А.А. Демин, С.А.** Холодное газодинамическое напыление покрытий (Обзор) // *Труды ВИАМ*. – 2020. – №8 (90), С. 77-92.
8. **Singh, S., Berndt, C.C., Raman, R.K.S., Singh, H.** Influence of cold spray parameters on bonding mechanisms: A Review // *Metals*. – 2021. – Vol. 11. – No. 12.
9. **Cold spray deformation and deposition of blended feedstock powders not necessarily obey the rule of mixture/ R. Nikbakht, H. Assadi, K. Jahani et.al.** // *Surface and coatings technology*. – 2021. – Vol. 424. – P. 127644
10. **Trueba, M., Trassatti, S.P.** γ -Alumina as a support for catalysts: A review of fundamental aspects // *European journal of inorganic chemistry*. – 2005. – pp. 3393-3403.

11. **Яковлева, Н.В., Макаров, А.М., Пovyшев, А.М., Шишкова, М.Л.** Исследование фазовых превращений при синтезе каталитических покрытий на металлическом носителе // *Журнал прикладной химии*. – 2018. – Т. 91. – №1. – С. 36-44.

REFERENCES

1. **Preparation of Pt/ γ -Al₂O₃ catalyst coating in microreactors for catalytic methane combustion/ L. He, Y. Fan, L. Luo et.al.** // *Chemical Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 380, P. 122424.
2. **Dry Methane Reforming Performance of Ni-based catalyst coated onto stainless steel substrate / S. Sangsonga, M. Phongaksorna, S. Tungkamaniam et.al.** // *Energy Procedia*. – 2015. – Vol. 79, pp. 137-142.
3. **Kramer, M., Watson, M., McKelvie, M.**, Additive Manufacturing of Catalyst Substrates for Steam-Methane Reforming // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2018. – Vol. 27. – No. 1. – pp. 21-31.
4. **Milt, V.G., Ivanova, S., Sanz, O., Domínguez, M.I.** Au/TiO₂ supported on ferritic stainless steel monoliths as CO oxidation catalysts // *Applied Surface Science*. – 2013. – Vol. 270. – pp. 169-177.
5. **Govender, S., Friebich, H.B.** Monoliths: A Review of the basics, preparation methods and their relevance to oxidation // *Catalysts*. – 2017. – Vol. 7. – No. 2. – p. 62.
6. **Alphonse, P., Ansart, F.** Catalytic coatings on steel for low-temperature propane prereforming to solid oxide fuel cell (SOFC) application // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2009. – Vol. 336. – No. 2. – PP. 658-666.
7. **Kozlov, I.A., Kleshchev, K.A., Nikiforov, A.A. Demin, S.A.** Cold gas-dynamic coating deposition (Review) // *Proceedings of VIAM (All-Russian Research Institute of Aviation Materials)*, 2020, no.8 (90), pp. 77-92.
8. **Singh, S., Berndt, C.C., Raman, R.K.S., Singh, H.** Influence of cold spray parameters on bonding mechanisms: A Review // *Metals*. – 2021. – Vol. 11. – No. 12.
9. **Cold spray deformation and deposition of blended feedstock powders not necessarily obey the rule of mixture/ R. Nikbakht, H. Assadi, K. Jahani et.al.** // *Surface and coatings technology*. – 2021. – Vol. 424. – P. 127644
10. **Trueba, M., Trassatti, S.P.** γ -Alumina as a support for catalysts: A review of fundamental aspects // *European journal of inorganic chemistry*. – 2005. – pp. 3393-3403.
11. **Yakovleva, N.V., Makarov, A.M., Povyshev, A.M., Shishkova, M.L.** Investigation of phase transformations in the synthesis of catalytic coatings on a metal substrate / *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2018, vol. 91, no.1, PP. 34-44.

Вклад авторов: Яковлева Н.В. – идея; проведение исследований; сбор материала; обработка материала; написание статьи; Фармаковский Б.В. – идея; научное редактирование текста; Макаров А.М. – изготовление образцов; проведение исследований; Старицын М.В. – проведение исследований.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: Yakovleva N.V. – idea; conducting research; collecting material; processing material; writing an article; Farmakovskiy B.V. – idea; scientific text editing; Makarov A.M. – production of samples; conducting research; Staritsyn M.V. – conducting research..

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.11.2021; одобрена после рецензирования 21.01.2022; принята к публикации 30.01.2022.

The article was submitted 12.11.2021; approved after reviewing 21.01.2022; accepted for publication 30.01.2022.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Редактор Д.А. Петраченко. Технический редактор А.А. Алисов.

Сдано в набор 16.05.2022. Выход в свет 30.05.2022.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Брянский государственный технический университет»
241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16