

Научная статья

УДК 621.762

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-90-99

ПОРОШКОВОЕ ХРОМИРОВАНИЕ И ХРОМОАЛИТИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

Д.С. Кашин¹, Е.Н. Азаровский¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Проведены исследования поверхности образцов из никелевого сплава после нанесения диффузионных покрытий из порошков. Нанесение хромовых и хромоалюминидных покрытий проводили в атмосферных печах по параметрам температурно-временного интервала. Определены значения изменения массы образцов и глубины диффузии покрытий. Дан металлографический и микрорентгеноспектральный анализ образцов. По результатам исследований сделано заключение, что после проведения порошкового хромирования глубина диффузионной зоны покрытия составила до 18 мкм с концентрацией хрома до 92 %. При нанесении хромоалюминидных покрытий в основном проходит алитирование, при этом диффузии хрома и железа не наблюдается.

Ключевые слова: никелевый сплав, порошковое хромоалитирование, диффузионное покрытие, термодиффузионное насыщение, растровая электронная микроскопия

Для цитирования: Кашин Д.С., Азаровский Е.Н. Порошковое хромирование и хромоалитирование поверхности никелевого сплава // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-90-99.

Scientific article

POWDER CHROMIUM PLATING AND CHROMIUM ALUMINIZING OF NICKEL ALLOY SURFACE

D.S. Kashin¹, E.N. Azarovskiy¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Investigations of the surface of a nickel alloy after the penetration of diffusion coatings from powders were carried out. Application of chrome and chromoaluminide screens on atmospheric devices according to the parameters of the temperature-time interval. Determining the values of change in the mass of samples and the degree of diffusion of the surface. Given metallographic and X-ray microspectral analysis of samples. According to the research results, it was found that after powder chromium plating, the depth of the diffusion zone reaches 18 microns with a chromium concentration of up to 92 %. With the appearance of chromoaluminide surfaces, aluminization mainly takes place, while the diffusion of chromium and iron is not observed.

Keywords: nickel alloy, powder chromium aluminizing, diffusion coating, thermal diffusion saturation, scanning electron microscopy

For citation: Kashin D.S., Azarovskiy E.N. Powder chromium plating and chromium aluminizing of nickel alloy surface. *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-90-99.

Введение

В отечественной авиационной машиностроительной отрасли для изготовления рабочих и сопловых лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) применяются жаропрочные сплавы на никелевой основе марок ЖС6, ЖС26, ЖС32, ВЖМ4 и т. д. [1–5]. Несмотря на высокие значения свойств этих сплавов по жаростойкости и коррозионной стойкости, актуальной остается задача повышения их надежности и долговечности с целью увеличения их ресурса, так как при работе охлаждаемых лопаток ГТД в диапазоне температур от 950 до 1150 °С в процессе высокотемпературной газовой коррозии происходят изменения физических и химических свойств их рабочих поверхностей (внешней и внутренней), что приводит к ускоренному износу и отработке ответственных деталей [6]. Для решения этой задачи на охлаждаемые рабочие и сопловые лопатки ГТД и ГТУ, выполненные из сплавов на никелевой основе, на внешнюю трактовую поверхность и внутреннюю полость наносят защитные жаростойкие покрытия, применяя различные технологии и методы их нанесения. При этом конструкция и химический состав покрытия выбираются исходя из состава сплава лопатки, рабочей температуры эксплуатации и условий работы в составе ГТД или ГТУ. Учитывается также, что требования к покрытиям на внешней поверхности значительно отличаются от требований к покрытиям на внутренней поверхности из-за различных температурных условий и агрессивности среды при эксплуатации этих поверхностей.

При нанесении ионно-плазменных конденсационных, конденсационно-диффузионных и диффузионных жаростойких и коррозионностойких покрытий для защиты внешней поверхности деталей ГТД и ГТУ широко применяется метод вакуумной плазменной технологии высоких энергий (ВПТВЭ). Технология нанесения ионно-плазменных жаростойких и коррозионностойких покрытий и получаемые свойства этих покрытий подробно описаны в работах НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ) [7–11]. Для защиты поверхностей любой сложности и конфигурации внутренней полости охлаждаемых сопловых и рабочих лопаток для турбины ГТД или ГТУ, выполняемых из жаростойких никелевых сплавов, в газотурбостроении применяются процессы насыщения из газовой фазы (газоциркуляционный способ нанесения покрытий) [12, 13] либо порошковый метод нанесения покрытий [14]. При защите поверхности безуглеродистых жаропрочных никелевых сплавов, таких как ЖС36, ВЖМ и т. д., содержащих большое количество редкоземельных и тугоплавких элементов (Cr, W, Mo, Ta, Re, Ru и т. д.), дополнительно применяется процесс цементации для формирования барьерного слоя. Сформированный барьерный слой на основе углерода препятствует диффузии компонентов жаростойкого покрытия в никелевый сплав и исключает появление вторичной реакционной зоны и топологически плотноупакованных (ТПУ) фаз, которые приводят к снижению механических свойств сплава [15–17]. Нанесение диффузионных покрытий на основе хрома или алюминия на поверхность никелевых сплавов позволяет повысить жаростойкость и коррозионную стойкость деталей ГТД и ГТУ, работающих в диапазоне температур от 950 до 1100 °С.

В данной статье приведены результаты проведения экспериментального одностадийного процесса термодиффузионного порошкового хромирования или хромоалитирования поверхности никелевого сплава с заданным температурно-временным интервалом.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках стратегического научного направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие и теплозащитные защитные покрытия» комплексной научной проблемы 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие

эрозионно- и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [18].

Материалы и методы

Для изучения одностадийного процесса термодиффузионного порошкового хромирования, хромоалитирования и/или алитирования поверхностного слоя жаропрочного никелевого сплава изготовлены стандартные образцы простой формы диаметром 25,0 (+0,4) мм и толщиной 3,0 (+0,2) мм.

Для приготовления рабочих смесей использованы: порошок ферроалюминия (FeAl) марки ФА50, порошок хрома (Cr) марки ПХ1М и белый электрокорунд (Al_2O_3) марки 25А F100 с размером зерна основной фракции от 120 до 160 мкм. Перед процессом термодиффузионного насыщения приготовленные рабочие порошковые смеси подвергали специальной двойной прокалке по режимам ВИАМ. Составы рабочих порошковых смесей, использованных для нанесения покрытий термодиффузионным методом, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Составы порошковых рабочих смесей для нанесения покрытий термодиффузионным способом на поверхность никелевого сплава

Условный номер смеси	Содержание компонентов порошковой смеси, % (по массе)		
	ФА50 (FeAl)	ПХ1М (Cr)	электрокорунд марки 25А F100 (Al_2O_3)
1	0	50,0	50,0
2	12,5	37,5	50,0
3	25,0	25,0	50,0
4	37,5	12,5	50,0
5	50,0	0	50,0

Перед проведением процесса нанесения покрытий термодиффузионным методом поверхность образцов из жаропрочного никелевого сплава обработали путем опескоструивания электрокорундом (Al_2O_3) с дальнейшей промывкой в ультразвуковой ванне с дистиллированной водой в течение 20 мин для более качественного удаления остатков твердых частиц абразивного материала. После промывки в ультразвуковой ванне образцы высушивали в атмосферной электропечи с циркуляцией воздуха до полного удаления влаги, а затем измеряли при помощи штангенциркуля и взвешивали на аналитических весах для проведения гравиметрического контроля.

Для нанесения покрытий термодиффузионным способом образцы помещали в алуновы тигли с рабочей порошковой смесью. Тигли размещали в специальном контейнере с возможностью продувки нейтральным газом (аргоном) для исключения окисления поверхности образцов и рабочей смеси в процессе высокотемпературной выдержки в атмосферной электропечи. Подготовленный контейнер с образцами размещали в рабочей камере атмосферной электропечи, предварительно разогретой до температуры процесса. Выдержку в атмосферной электропечи проводили по заданному временному интервалу. По окончании процесса термодиффузионного насыщения образцы очищали от остатков порошкового материала, после чего проводили гравиметрический контроль путем взвешивания на аналитических весах с точностью измерения до четвертого знака после запятой.

Для контроля и определения толщины полученных диффузионных покрытий проведены металлографические исследования, а также определен химический состав

диффузионных покрытий на сканирующем растровом электронном микроскопе (РЭМ) Inspect F50 фирмы FEI (США) с использованием энергодисперсионного анализатора (EDS/ЭДА).

Результаты и обсуждение

Металлографический анализ показал, что после проведения процесса термодиффузионного насыщения при заданном температурно-временном интервале на поверхности образцов из жаропрочного никелевого сплава присутствуют зоны диффузионного взаимодействия сплава с покрытием. На рис. 1 представлены микроструктуры, полученные на растровом электронном микроскопе при увеличениях $\times 1000$ и $\times 2000$.

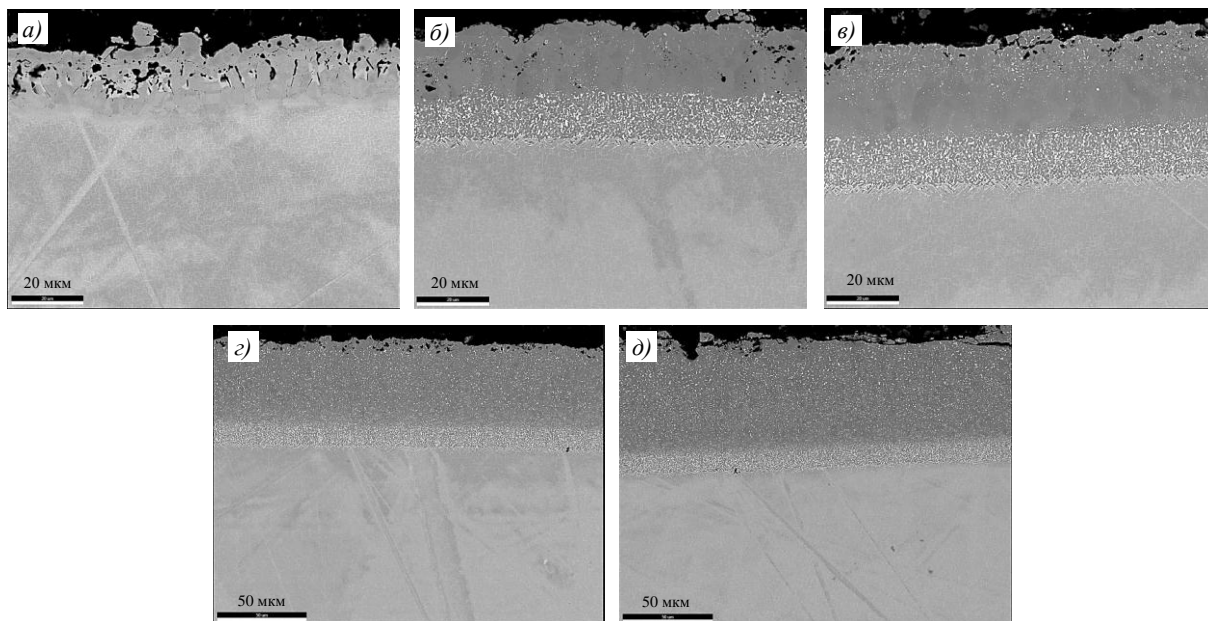


Рис. 1. Микроструктуры образцов из никелевого сплава с диффузионными покрытиями, нанесенными из выбранных составов рабочих смесей (см. табл. 1): *a* – смесь 1 ($50\text{Cr} + 50\text{Al}_2\text{O}_3$); *b* – смесь 2 ($12,5\text{FeAl} + 37,5\text{Cr} + 50\text{Al}_2\text{O}_3$); *c* – смесь 3 ($25,0\text{FeAl} + 25,0\text{Cr} + 50\text{Al}_2\text{O}_3$); *d* – смесь 4 ($37,5\text{FeAl} + 12,5\text{Cr} + 50\text{Al}_2\text{O}_3$); *e* – смесь 5 ($50,0\text{FeAl} + 50\text{Al}_2\text{O}_3$)

Видно, что структура покрытия, нанесенного с применением рабочей смеси 1 (рис. 1, *a*), существенно отличается от структур покрытий, полученных с использованием рабочих смесей 2–5 (рис. 1, *b–d*). Структура покрытий, полученных с использованием смесей 2–5, содержащих ферроалюминий, характерна для алюминидных покрытий, полученных термодиффузионным методом.

На образце (рис. 1, *a*) с покрытием, нанесенным из рабочей смеси 1 ($50\text{Cr} + 50\text{Al}_2\text{O}_3$), наблюдается диффузионная зона хрома (Cr) глубиной до 18 мкм, на которой также видно изменение структуры поверхностного слоя жаропрочного сплава с образованием хрупких фаз, которые во время шлифовки и полировки выкрашиваются и на металлографическом шлифе присутствуют в виде черных областей. Толщина покрытия, полученного с использованием смеси 2 (рис. 1, *b*), составляет до 31 мкм, при этом покрытие имеет двухзонную структуру. От поверхности до глубины 17 мкм сформировался слой моноалюминида никеля NiAl (β -фаза) с редкими включениями чистого хрома (α -Cr) в виде белых точек. В переходной зоне на глубине от 17 до 31 мкм наблюдается большое скопление вытесненного хрома (α -Cr), изначально содержащегося в сплаве. Данное строение характерно для покрытий, сформированных с использованием

рабочих смесей, содержащих ферроалюминий (смеси 2–5) и имеющих глубину диффузионного слоя покрытия от 31 до 70 мкм соответственно. При этом необходимо отметить, что на всех образцах с покрытиями, полученными из смесей, содержащих ферроалюминий, глубина (толщина) переходной зоны с выпадением большого количества вытесненного хрома (α -Cr) в среднем составляет от 11 до 14 мкм, независимо от глубины диффузии покрытия (толщины диффузионного покрытия) и процентного соотношения ферроалюминия к хрому и электрокорунду в порошковой рабочей смеси. На образцах с диффузионными покрытиями, сформированными с использованием рабочих смесей 2–5, содержащих ферроалюминий, после переходной зоны также наблюдается начало образования вторичной реакционной зоны, в которой образовались ТПУ-фазы, проникающие на глубину от 3 до 4 мкм.

В табл. 2 приведены сводные данные по результатам гравиметрического контроля с определением удельного изменения массы образцов (привеса) и толщины диффузионных покрытий, полученных с использованием выбранных составов порошковых рабочих смесей.

Таблица 2

Значения удельного изменения массы (привеса) и толщины диффузионных покрытий

Условный номер рабочей смеси	Состав рабочей смеси	Условный номер образца	Удельное изменение массы (привес), г/м ²	Толщина диффузионного покрытия, мкм
1	50Cr + 50Al ₂ O ₃	1	65,39	18
		2	64,24	
		3	60,13	
2	12,5FeAl + 37,5Cr + 50Al ₂ O ₃	4	37,05	31
		5	34,75	
		6	32,45	
3	25,0FeAl + 25,0Cr + 50Al ₂ O ₃	7	46,91	40
		8	44,03	
		9	44,85	
4	37,5FeAl + 12,5Cr + 50Al ₂ O ₃	10	73,77	59
		11	73,11	
		12	72,95	
5	50,0FeAl + 50Al ₂ O ₃	13	104,16	70
		14	103,83	
		15	102,27	

Как видно из представленных в табл. 2 сводных данных определения удельного изменения массы образцов, при нанесении диффузионных покрытий из порошковых рабочих смесей 2–5, содержащих ферроалюминий, привес и толщина диффузионного покрытия увеличиваются с ростом концентрации ферроалюминия в смеси.

Для более подробного анализа полученных диффузионных покрытий в областях исследованных микроструктур выбраны зоны сканирования для определения химического состава при проведении микрорентгеноспектрального анализа. На рис. 2 представлены зоны исследования распределения основного элементного состава от поверхности вглубь сплава. Исследования химического состава диффузионных покрытий проводили по основным элементам системы «сплав–покрытие», дополнительно проведен анализ распределения железа для выявления «загрязнения» покрытий при применении рабочих смесей 2–5. Рабочая смесь 1 не содержала в своем составе ферроалюминия.

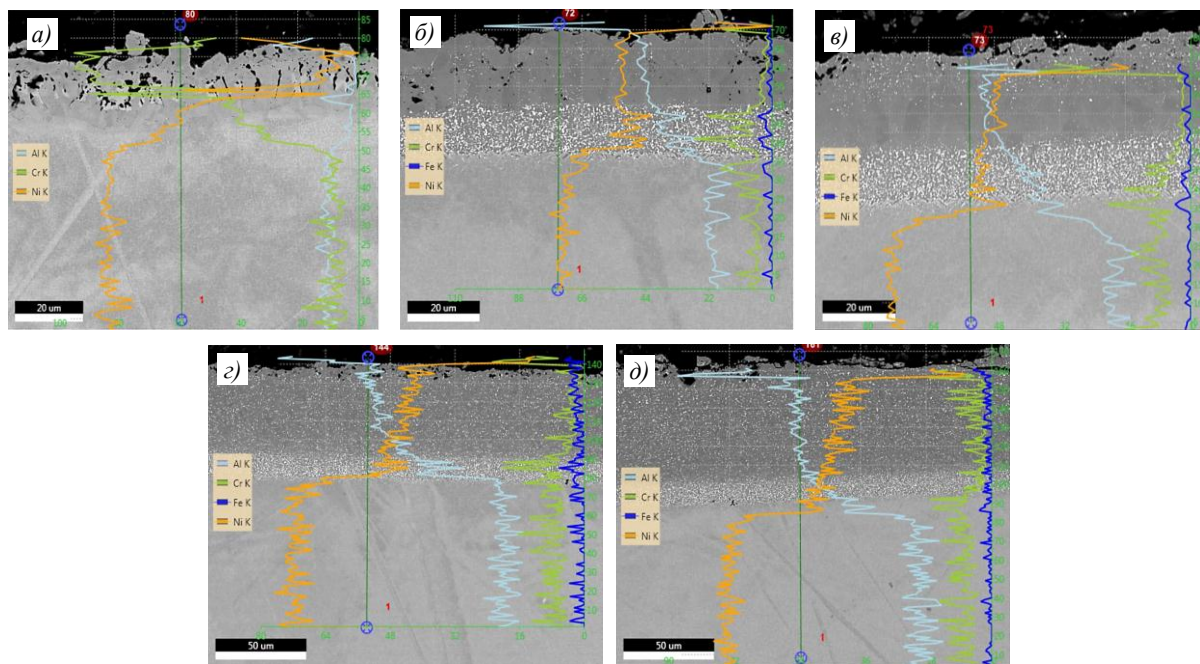


Рис. 2. Зоны исследования распределения элементов в диффузионных покрытиях: *a* – смесь 1 ($50\text{Cr} + 50\text{Al}_2\text{O}_3$); *б* – смесь 2 ($12,5\text{FeAl} + 37,5\text{Cr} + 50\text{Al}_2\text{O}_3$); *в* – смесь 3 ($25,0\text{FeAl} + 25,0\text{Cr} + 50\text{Al}_2\text{O}_3$); *г* – смесь 4 ($37,5\text{FeAl} + 12,5\text{Cr} + 50\text{Al}_2\text{O}_3$); *д* – смесь 5 ($50,0\text{FeAl} + 50\text{Al}_2\text{O}_3$)

На рис. 3 представлены графики зависимости распределения основных элементов Al, Cr, Fe и Ni (% (по массе)) в покрытиях по глубине диффузионной зоны.

Приведенные результаты элементного анализа подтверждают основные выводы, сделанные по анализу микроструктур (рис. 1). Анализ графиков на рис. 3, *a* показал, что после проведения термодиффузионного насыщения с использованием порошковой рабочей смеси 1, прошло нанесение покрытия с содержанием хрома (Cr) от 86 до 92 % (по массе) при содержании Ni от 7 до 13 % (по массе) и остаточном содержании Al до 1 % (по массе).

Анализ графиков на рис. 3, *б* показал, что после проведения порошкового нанесения покрытия на поверхность никелевого сплава с использованием рабочей смеси 2, при толщине (глубине) покрытия до 17 мкм, содержание никеля и алюминия во внешнем слое покрытия составляет: алюминия (Al) – от 40 до 50 % (по массе), никеля (Ni) – от 42 до 55 % (по массе), что соответствует стехиометрическому составу для β -фазы (интерметаллид NiAl), при этом содержание хрома (Cr) в этой зоне не превышает 3–8 % (по массе). В переходной зоне на глубине от 17 до 31 мкм содержание никеля (Ni) и алюминия (Al) снижается до 42 и 26 % (по массе) соответственно, при этом повышается содержание хрома (Cr) до 23–26 % (по массе), вытесненного из внешней зоны покрытия.

Анализ графиков на рис. 3, *в* показал, что после нанесения диффузионного покрытия на поверхность никелевого сплава с использованием рабочей смеси 3, при толщине (глубине) покрытия до 25 мкм, содержание алюминия (Al) повышается с 50 до 52 % (по массе) при содержании никеля (Ni) от 46 до 48 % (по массе), при этом содержание хрома (Cr) в этой зоне не превышает 4 % (по массе). В переходной зоне на глубине от 25 до 30 мкм содержание алюминия (Al) плавно снижается до 25 % (по массе), при этом, в отличие от предыдущего образца, содержание никеля (Ni) повышается с 48 до 54 % (по массе), с увеличением содержания хрома (Cr) – с 3 до 20 % (по массе).

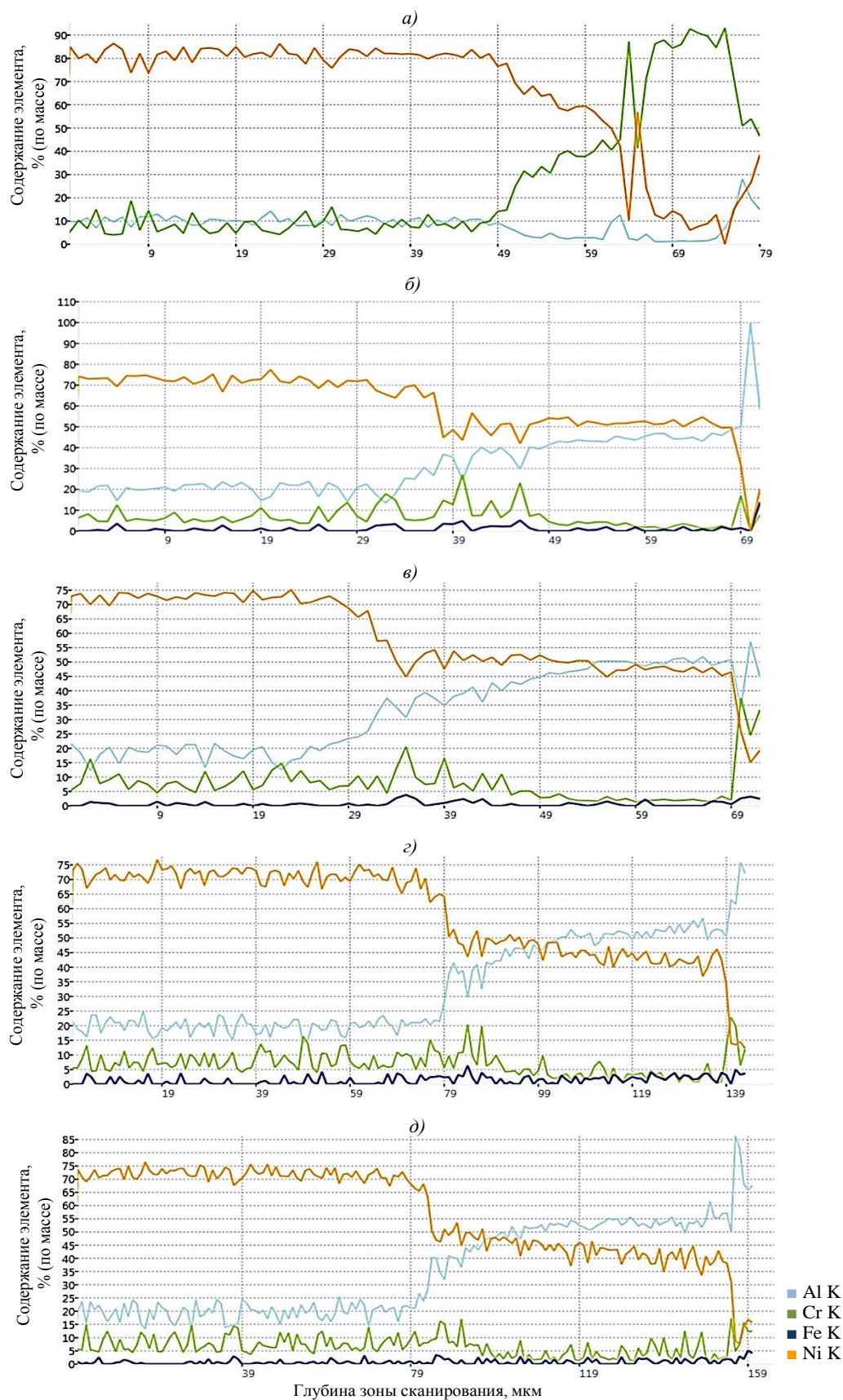


Рис. 3. Распределение основных элементов в диффузионном покрытии, сформированном с использованием рабочих смесей 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и 5 (д)

Анализ графиков на рис. 3, з показал, что после нанесения покрытия на поверхность никелевого сплава с использованием смеси 4, при толщине (глубине) диффузионной зоны до 47 мкм, содержание алюминия (Al) повышается с 52 до 56 % (по массе) при содержании никеля (Ni) от 46 до 48 % (по массе), при этом содержание хрома Cr в этой зоне не превышает 5 % (по массе). В переходной зоне на глубине от 47 до 59 мкм содержание алюминия (Al) плавно снижается с 46 до 22 % (по массе), содержание никеля (Ni) повышается с 43 до 64 % (по массе), при этом содержание хрома (Cr) повышается с 5 до 20 % (по массе).

Анализ графиков на рис. 3, д показал, что после нанесения диффузионного покрытия на поверхность никелевого сплава с использованием смеси 5, при толщине (глубине) диффузионной зоны до 40 мкм, содержание алюминия (Al) повышается с 46 до 61 % (по массе) при содержании никеля (Ni) от 35 до 48 % (по массе), при этом хром (Cr) распределен неравномерно и его содержание составляет от 3 до 15 % (по массе). В переходной зоне на глубине от 70 до 82 мкм содержание алюминия (Al) плавно снижается с 46 до 23 % (по массе), содержание никеля (Ni) повышается с 43 до 53 % (по массе), при этом содержание хрома (Cr) не превышает 17 % (по массе).

Необходимо отметить, что во всех случаях использования порошка ферроалюминия в составе рабочих смесей железо (Fe) не оказывало воздействия на процесс диффузии алюминия (Al), и при анализе химического состава не выявлено повышения концентрации железа в покрытиях или в сплаве под покрытиями. Во всех случаях содержание железа не превышает следовых значений. В случае использования порошковых рабочих смесей 2–4, содержащих в своем составе хром, также не удалось выявить роста концентрации хрома (Cr) в покрытиях. При этом с уменьшением концентрации хрома (Cr) в составе рабочей смеси и увеличении содержания ферроалюминия (FeAl) возрастают привес и толщина алюминидного покрытия при тех же технологических режимах его нанесения.

Заключения

Анализ результатов исследования образцов, выполненных из жаропрочного никелевого сплава с диффузионными покрытиями толщиной от 18 до 70 мкм в зависимости от состава порошковых смесей, показал, что после проведения термодиффузионного хромирования (смесь 1) при глубине диффузионной зоны до 18 мкм наблюдается формирование диффузионного покрытия с концентрацией хрома до 92 %.

На образцах с диффузионными покрытиями, нанесенными из рабочих смесей 2–5 при термодиффузии, в основном проходит процесс алитирования из-за высокой диффузионной подвижности алюминия, при этом в диффузионных покрытиях образуется жаростойкий слой, состоящий из β -фазы (интерметаллид NiAl) с вытеснением α -Cr к границе «сплав–диффузионное покрытие». Результаты микрорентгеноспектрального анализа показали, что для выбранных составов рабочих смесей 2–5 с применением ферроалюминия диффузии хрома и железа из порошкового материала в поверхность жаростойкого никелевого сплава не происходит.

Для дальнейшего изучения одностадийного процесса формирования хромоалюминидного термодиффузионного покрытия на поверхности никелевого сплава необходимо продолжить работы по подбору оптимального соотношения компонентов хрома и ферроалюминия, а также температуры и продолжительности проведения процесса.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. № 3. С. 10–15.
2. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок // Крылья Родины. 2010. № 4. С. 31–33.

3. Каблов Е.Н., Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. История развития технологии направленной кристаллизации и оборудования для литья лопаток газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
4. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Луцкая С.А., Дмитриев Н.С. Литейный интерметаллидный сплав на основе соединения Ni₃Al для турбинных лопаток газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.07.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-5-17.
5. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
6. Коломьцев П.Г. Газовая коррозия и прочность никелевых сплавов. М: Металлургия, 1984. 215 с.
7. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Ионно-плазменная технология: перспективные процессы, покрытия, оборудование // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 39–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-39-54.
8. Мубояджян С.А., Каблов Е.Н., Будиновский С.А. Вакуумно-плазменная технология получения защитных покрытий из сложнолегированных сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 1995. № 2. С. 15–18.
9. Будиновский С.А., Мубояджян С.А. Эффективность двухстадийной ионно-плазменной технологии получения легированных диффузионных алюминидных покрытий на жаропрочных никелевых сплавах // Металловедение и термическая обработка металлов. 2003. № 5. С. 27–32.
10. Матвеев П.В., Будиновский С.А. Исследование свойств защитных жаростойких покрытий для интерметаллидных никелевых сплавов типа ВКНА для рабочих температур до 1300 °С // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3. С. 22–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-22-26.
11. Азаровский Е.Н., Доронин О.Н., Мубояджян С.А. Образование пористости на границе «жаропрочный сплав–жаростойкое конденсационно-диффузионное покрытие» // Труды ВИАМ. 2019. № 2 (74). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-113-120.
12. Симонов В.Н., Абраимов Н.В., Шкретов Ю.П., Лукина В.В., Терехин А.М. Хромоалитирование циркуляционным способом охлаждаемых лопаток газовых турбин // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. № 7 (625). С. 36–39.
13. Способ одностадийного диффузионного хромоалитирования деталей из жаропрочных сплавов: пат. RU 2572690С2; заявл. 05.05.14; опубл. 01.20.16.
14. Способ получения комбинированного жаростойкого покрытия: пат. № 1658652 Рос. Федерация; заявл. 08.04.1988; опубл. 20.12.00.
15. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Галоян А.Г. Защитные и упрочняющие покрытия лопаток турбин ГТД // Труды Междунар. науч.-техн. конф. «Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение» (Москва, 25–26 апр. 2006 г.). М.: ВИАМ, С. 55–65.
16. Мубояджян С.А., Галоян А.Г. Термодиффузионные процессы насыщения поверхности жаропрочных сплавов тугоплавкими элементами и углеродом // Технология легких сплавов. 2007. № 2. С. 114–120.
17. Галоян А.Г., Мубояджян С.А., Кашин Д.С. Формирование термодиффузионных барьерных слоев на поверхности безуглеродистых жаропрочных рений- и рений-рутенийсодержащих сплавов методом газовой цементации // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 3 (36). С. 27–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-27-37.
18. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.

References

1. Kablov E.N. Modern materials – the basis of innovative modernization of Russia. *Metally Evrazii*, 2012, no. 3, pp. 10–15.
2. Kablov E.N. Developments of VIAM for gas turbine engines and installations. *Krylya Rodiny*, 2010, no. 4, pp. 31–33.
3. Kablov E.N., Echin A.B., Bondarenko Yu.A. History of development of directional crystallization technology and equipment for casting blades of gas turbine engines. *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 04, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.

4. Bazyleva O.A., Arginbayeva E.G., Lutskaya S.A., Dmitriev N.S. Foundry intermetallic alloy based on Ni₃Al compound for turbine blades gas turbine engines. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 4, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-5-17.
5. Bondarenko Yu.A. Trends in the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
6. Kolomytsev P.G. *Gas corrosion and strength of nickel alloys*. Moscow: Metallurgy, 1984, 215 p.
7. Muboyadzhyan S.A., Budinovskij S.A. Ion-plasma technology: prospective processes, coatings, equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 39–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-39-54.
8. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N., Budinovskiy S.A. Vacuum-plasma technology for obtaining protective coatings from complex alloyed alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1995, no. 2, pp. 15–18.
9. Budinovskiy S.A., Muboyadzhyan S.A. Efficiency of a two-stage ion-plasma technology for obtaining alloyed diffusion aluminide coatings on heat-resistant nickel alloys. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*, 2003, no. 5, pp. 27–32.
10. Matveev P.V., Budinovskij S.A. Research of the properties of protective heat-resistant coating for intermetallic nickel alloys operating at temperatures up to 1300 °C. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 3, pp. 22–26.
11. Azarovskiy E.N., Doronin O.N., Muboyadzhyan S.A. Formation of porosity on the border «of heat-resistant alloy–heat-resistant condensation-diffusion coating». *Trudy VIAM*, 2019, no. 2 (74), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 4, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-113-120.
12. Simonov V.N., Abraimov N.V., Shkretov Yu.P., Lukina V.V., Terekhin A.M. Chromium aluminizing of cooled gas turbine blades by the circulation method. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2007, no. 7 (625), pp. 36–39.
13. *The method of one-stage diffusion chromium-altering of parts from heat-resistant alloys*: pat. EN 2572690C2; filed 05.05.14; publ. 01.20.16.
14. *Method for obtaining a combined heat-resistant coating*: pat. 1658652 Rus. Federation; filed 08.04.88; publ. 20.12.00.
15. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A., Budinovskiy S.A., Galoyan A.G. Protective and hardening coatings for gas turbine turbine blades. *Proceedings of Intern. sci.-tech. conf. "Scientific ideas of S.T. Kishkin and modern materials science"* (Moscow, April 25–26, 2006). Moscow: VIAM, pp. 55–65.
16. Muboyadzhyan S.A., Galoyan A.G. Thermodiffusion processes of saturation of the surface of heat-resistant alloys with refractory elements and carbon. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2007, no. 2, pp. 114–120.
17. Galoyan A.G., Muboyadzhyan S.A., Kashin D.S. Termodiffusion barrier formation under vacuum cementation process on rhenium and rhenium-ruthenium comprising nickel based superalloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 3 (36), pp. 38–43. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-27-37.
18. Kablov E.N. Materials of the new generation – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.

Информация об авторах

Кашин Дмитрий Сергеевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Азаровский Евгений Николаевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Dmitry S. Kashin, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeny N. Azarovskiy, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 07.07.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.07.2022.
The article was submitted 07.07.2022; approved and accepted for publication after reviewing 11.07.2022.