

Научная статья
УДК 620.22
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.007

ПОЛУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ЖИДКОСТНОГО АЛИТИРОВАНИЯ

Артём Игоревич Богданов¹, Виталий Павлович Кулевич², Виктор Георгиевич Шморгун³, Роман Дмитриевич Евчиц⁴

^{1,2,3,4}Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

¹bogdanov@vstu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3918-775X>

²kulevich.vp@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6041-8423>

³vgshmorgun@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3282-2880>

⁴evchits@yandex.ru

Аннотация

Приведены результаты исследования эволюции микроструктуры и состава диффузионных покрытий, формирующихся на поверхности нихромового сплава X20Ni80 при его погружении в расплав алюминия, в зависимости от температурно-временных параметров процесса алитирования.

Ключевые слова:

нихром, расплав алюминия, покрытие, диффузия, интерметаллиды

Благодарности:

исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10246, <https://rscf.ru/project/21-79-10246/>.

Для цитирования:

Получение функциональных покрытий на поверхности никелевых сплавов методом жидкостного алитирования / А. И. Богданов [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 2. С. 45–49. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.007

Original article

DESIGN OF FUNCTIONAL COATINGS ON THE NICKEL ALLOYS SURFACE BY THE HOT-DIP ALUMINIZING

Artem I. Bogdanov¹, Vitaly P. Kulevich², Viktor G. Shmorgun³, Roman D. Evchits⁴

^{1,2,3,4}Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹bogdanov@vstu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3918-775X>

²kulevich.vp@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6041-8423>

³vgshmorgun@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3282-2880>

⁴evchits@yandex.ru

Abstract

The paper presents the results of a study of the microstructure and composition evolution of the diffusion coatings formed on the Cr20Ni80 alloy surface during hot-dip aluminizing depending on the temperature-time parameters of the aluminizing process.

Keywords:

nichrome, aluminum melt, coating, diffusion, intermetallics

Acknowledgments:

the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-79-10246, <https://rscf.ru/project/21-79-10246/>.

For citation:

Design of functional coatings on the nickel alloys surface by the hot-dip aluminizing / A. I. Bogdanov [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 2. P. 45–49. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.007

Введение

Необходимость повышения эксплуатационной надежности и срока службы изделий из жаропрочных никелевых сплавов, работающих в условиях высокотемпературного и эрозионного воздействия, ставит задачу поиска эффективных технологических решений по созданию на их поверхности функциональных покрытий. Как показывает анализ литературы, в большинстве случаев задача повышения жаростойкости решается путем нанесения алюминидных покрытий методами диффузионного насыщения из различных сред [1–6]. Наиболее простым и технологически доступным методом насыщения является алитирование методом погружения заготовки в расплав алюминия [7].

Одной из основных проблем, возникающих при разработке технологических процессов пролущения покрытий методом погружения в расплав, является необходимость строгого контроля степени взаимодействия альтируемой заготовки с жидким алюминием поскольку высокая скорость диффузионных процессов, происходящих в присутствии жидкой фазы [8–10], может обуславливать значительное изменение формы и размеров изделия. Оптимальные температурно-временные условия процесса алитирования должны обеспечить формирование на поверхности заготовки покрытия с требуемыми толщиной, составом и структурой при минимальном времени воздействия высоких температур расплава на подложку. Однако литературные данные, касающиеся процессов, происходящих при взаимодействии никелевых сплавов (например, нихромов с алюминием в условиях жидкостного алитирования), недостаточны.

Целью настоящей работы явилось исследование структуры, химического и фазового составов диффузионных алюминидных покрытий, формирующихся на поверхности нихромового сплава при его погружении в расплав алюминия, в зависимости от температурно-временных режимов процесса алитирования.

Материалы и методы

Механизм и кинетику взаимодействия исследовали при погружении нихрома марки X20H80 в расплав алюминия марки АД1. Образцы нихромового сплава размером $10 \times 10 \times 2$ мм были предварительно зачищены на шлифовальной бумаге и обезжирены. Для защиты от окисления на их поверхность наносили слой флюса на основе полиэфирной смолы. В керамических тиглях в печи SNOL 8,2/1100 при температурах 700–760 °С получали расплав алюминия, в который затем с помощью специального механизма погружали образцы сплава X20H80 со скоростью 10 мм/с. После выдержки в течение 0,5–10 мин образцы извлекались из тигля и охлаждались на воздухе.

Выбранный температурный диапазон ванны с расплавом Al был ограничен температурой плавления Al и температурой резкого повышения скорости окисления алюминиевого расплава [11]. При этом при температуре ниже 700 °С значительно повышается вероятность расслаивания покрытия.

Электронно-оптические исследования и определение химического состава (ЭДС-анализ) осуществляли на растровом двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D Dual Beam. Рентгенофазовый анализ (РФА) выполняли на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE ECO в излучении медного анода ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$).

Результаты и их обсуждение

Металлографические исследования показали, что после алитирования в течение 2 мин на поверхности сплава X20H80 формируется диффузионный слой (покрытие) (рис. 1), в котором отсутствуют дефекты кристаллизационного характера в виде пор и трещин. Меньшие времена выдержки позволяют сформировать очень тонкие покрытия (менее 50 мкм), однако такие покрытия были склонны к расслаиванию при охлаждении образца с температуры алитирования.

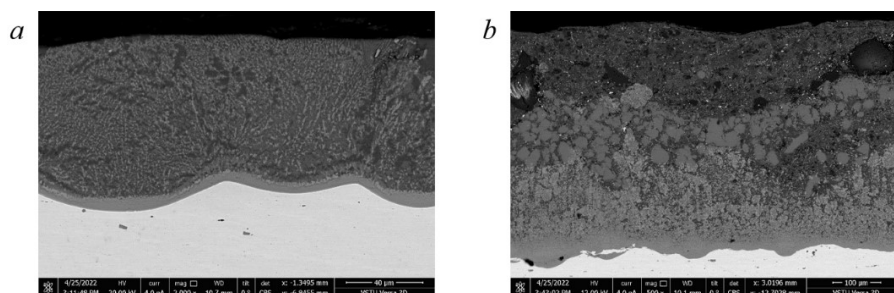


Рис. 1. СЭМ-изображения структуры покрытия на поверхности сплава X20H80 после алитирования при 740 (а) и 760 (б) °С в течение 2 мин

Структура покрытия имеет преимущественно гетерогенное строение, свойственное структурам эвтектического типа, и характеризуется значительной ликвацией. На границе раздела «покрытие — подложка» присутствуют две тонкие гомогенные сплошные прослойки. Для иллюстрации на рис. 2 приведены карты распределения Al, Cr и Ni в приконтактной зоне (см. рис. 1).

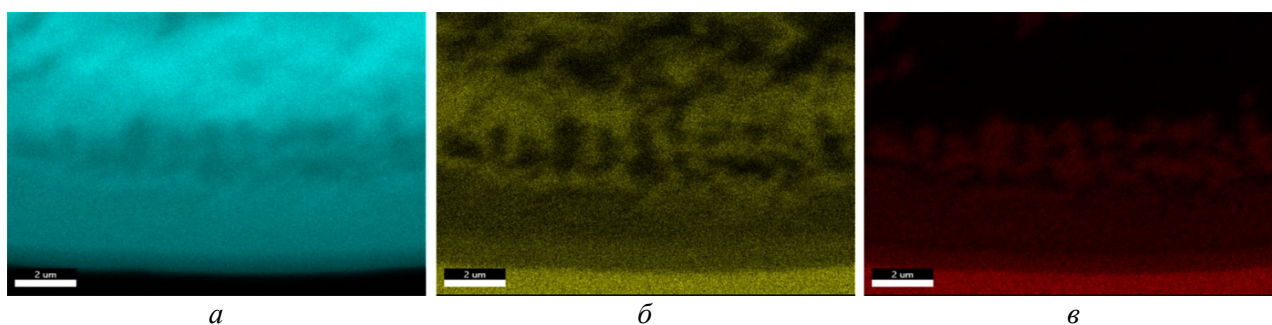


Рис. 2. Карты распределения Al (а), Cr (б) и Ni (в) в приконтактной зоне «покрытие — подложка» после алитирования при 740 °С в течение 2 мин

Из совокупности данных ЭДС и РФА можно заключить, что, независимо от температуры и времени выдержки при алитировании, в приповерхностном слое покрытие представляет собой закристаллизовавшуюся алюминиевую матрицу (Al) с участками эвтектики, соответствующей по составу смеси интерметаллидов CrAl_7 и Ni_2Al_9 . В некоторых областях наблюдаются довольно крупные отдельные округлые включения CrAl_7 . Наличие Ni_2Al_9 подтверждается сравнением данных РФА с данными работы [12], в которой подробно описана его кристаллическая структура.

По мере приближения к границе со сплавом X20H80 структура становится мелкодисперсной и представляет собой смесь $\text{NiAl}_3 + \text{CrAl}_7 + (\text{Al})$, в которой уменьшается доля (Al). Далее следует зона с составом $\text{NiAl}_3 + \text{CrAl}_7$ без регистрируемых участков закристаллизовавшегося алюминия. Микроструктурный анализ свидетельствует о том, что увеличение температуры алитирования при заданном времени выдержки и постоянной скорости охлаждения приводит к формированию после кристаллизации неоднородной структуры покрытия с более крупными отдельными фрагментами включений NiAl_3 и CrAl_7 .

Наблюдаемые на границе «покрытие — подложка» две тонкие прослойки представляют собой твердые растворы Cr в интерметаллидах NiAl_3 (со стороны покрытия) и Ni_2Al_9 (со стороны X20H80). Причем чем меньше температура алюминиевой ванны, тем больше общая толщина сплошных прослоек. Так, например, если после алитирования при температуре 700 °С она составляла 1,7 мкм, то после алитирования при 760 °С — 0,9 мкм.

Формирование в поверхностном слое метастабильной фазы Ni_2Al_9 вместо стабильной NiAl_3 (наблюдаемой в более глубоких слоях покрытия), вероятно, обусловлено значительно более высокими скоростями охлаждения на поверхности контакта с расплавом Al по сравнению со слоем, примыкающим к сплаву X20H80.

Увеличение времени нахождения сплава X20H80 в жидком алюминии при заданной температуре, не оказывая заметного влияния на структуру и состав покрытия, приводит к росту его суммарной толщины (рис. 3). Так, если после алитирования при 740 °С в течение 2 мин толщина покрытия составляла ~ 150 мкм, то после выдержки в течение 10 мин при этой же температуре — 880 мкм.

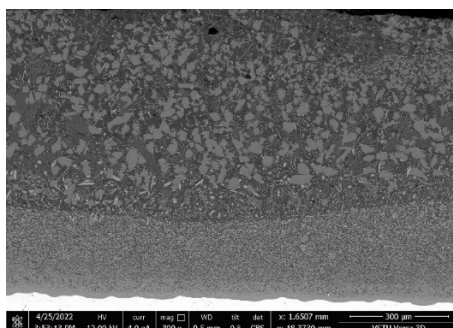


Рис. 3. СЭМ-изображение структуры покрытия на поверхности сплава X20H80 после алитирования при 740 °С в течение 10 мин

Из сопоставления литературных данных по высокотемпературному окислению промышленных никелевых сплавов [13] с изложенными экспериментальными данными следует ожидать высокую эксплуатационную надежность и жаростойкость полученных покрытий, обусловленные их высокой адгезией к подложке (на уровне прочности металла основы), а также высоким содержанием Al в поверхностном слое. Последнее, в свою очередь, при высокотемпературных нагревах обеспечивает формирование на поверхности покрытия защитной оксидной пленки на основе Al_2O_3 [14, 15].

Выводы

1. В результате алитирования сплава X20H80 в жидком алюминии на его поверхности формируется сплошное, равномерное по толщине покрытие без дефектов в виде пор и трещин. Покрытие имеет гетерогенную структуру. Со стороны подложки X20H80 всегда присутствуют тонкие (1–2 мкм) прослойки интерметаллидов Ni_2Al_3 и $NiAl_3$. Далее формируется мелкодисперсная механическая смесь $NiAl_3$ и $CrAl_7$ с плавным увеличением дисперсности, переходящая в смесь (Al) + $NiAl_3$ + $CrAl_7$. У поверхности покрытия формируется область с четко различимой границей, в которой формируется алюминиевая матрица с мелкодисперсными и крупными включениями $CrAl_7$ и появляется метастабильный интерметаллид Ni_2Al_9 .

2. Рост толщины покрытия может быть ограничен либо температурой расплава алюминия без предъявления требований ко времени нахождения сплава X20H80 при этой температуре, либо временем пребывания поверхности нихрома в алюминиевой ванне при высоких температурах.

Список источников

1. Sitek, R., Matysiak, H., Ferenc-Dominik, J., Kurzydowski, K. J. Structure and properties of nickel aluminide layers on Inconel 100 // *Materials Science Forum*. — Trans Tech Publications Ltd, 2010. — V. 636. — P. 1011–1018.
2. Yavorska, M., Sieniawski, J., Zielińska, M. Functional properties of aluminide layer deposited on Inconel 713 LC Ni-based superalloy in the CVD process // *Archives of Metallurgy and Materials*. — 2011. — N. 1. — P. 187–192.
3. Tagliaferri L. et al. Aluminizing via Ionic liquid electrodeposition and pack cementation: A comparative study with inconel 738 and a CoNiCrAlY // *Coatings*. — 2017. — V. 7, N 6. — P. 83.
4. Bozza F. et al. Diffusion mechanisms and microstructure development in pack aluminizing of Ni-based alloys // *Surface and Coatings Technology*. — 2014. — V. 239. — P. 147–159.
5. Moosa A., Ahmed J. K., Hoobi A. Corrosion properties of inconel alloy 600 coated by simultaneous aluminizing-chromizing process // *Materials science forum*. — Trans Tech Publications Ltd, 2007. — V. 546. — P. 1763–1768.
6. Döleker K. M. et al. Enhancing the wear and oxidation behaviors of the Inconel 718 by low temperature aluminizing // *Surface and Coatings Technology*. — 2021. — V. 412. — P. 127069.
7. Shmorgun V. G. et al. Microstructure and phase composition of diffusion coating formed in NiCr alloys by hot-dip aluminizing // *Surfaces and Interfaces*. — 2021. — V. 23. — P. 100988.
8. Kyriakopoulos A., Lynn M., Ghomashchi R. Reactive interaction of molten aluminum and solid nickel // *Journal of materials science letters*. — 2001. — V. 20, N. 18. — P. 1699–1701.
9. Lopez G. A. et al. Phase characterization of diffusion soldered Ni/Al/Ni interconnections // *Interface science*. — 2002. — V. 10. — P. 13–19.
10. Okane T. et al. Thermodynamic justification for the Ni/Al/Ni joint formation by a diffusion brazing // *International Journal of Thermodynamics*. — 2011. — V. 14, N 3. — P. 97–105.
11. Schmitz C. (ed.). *Handbook of aluminium recycling*. — Vulkan-Verlag GmbH, 2006.
12. Pohla C., Ryder P. L. Crystalline and quasicrystalline phases in rapidly solidified Al Ni alloys // *Acta materialia*. — 1997. — V. 45, N 5. — P. 2155–2166.
13. Tamarin Y. *Protective coatings for turbine blades*. — ASM international, 2002.
14. Bogdanov A. et al. Formation of Thermally Grown Aluminum Oxide Scale on the Surface of Ni_2Al_3 /Ni Layered Coating // *Oxidation of Metals*. — 2022. — V. 98, N 1–2. — P. 199–216.
15. Shmorgun V. G., Bogdanov A. I., Kulevich V. P. The oxidation behaviour of layered Al-Ni coating at high-temperature heating // *Materials Today: Proceedings*. — 2021. — V. 38. — P. 1627–1630.

References

1. Sitek, R., Matysiak, H., Ferenc-Dominik, J., Kurzydowski, K. J. Structure and properties of nickel aluminide layers on Inconel 100. *Materials Science Forum, Trans Tech Publications Ltd*, 2010, vol. 636, pp. 1011–1018.
2. Yavorska, M., Sieniawski, J., Zielińska, M. Functional properties of aluminide layer deposited on Inconel 713 LC Ni-based superalloy in the CVD process. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2011, no. 1, pp. 187–192.
3. Tagliaferri L. et al. Aluminizing via Ionic liquid electrodeposition and pack cementation: A comparative study with inconel 738 and a CoNiCrAlY. *Coatings*, 2017, vol. 7, no. 6, pp. 83.
4. Bozza F. et al. Diffusion mechanisms and microstructure development in pack aluminizing of Ni-based alloys. *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 239, pp. 147–159.
5. Moosa A., Ahmed J. K., Hoobi A. Corrosion properties of inconel alloy 600 coated by simultaneous aluminizing-chromizing process. *Materials science forum Trans Tech Publications Ltd*, 2007, vol. 546, pp. 1763–1768.
6. Döleker K. M. et al. Enhancing the wear and oxidation behaviors of the Inconel 718 by low temperature aluminizing. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 412, pp. 127069.

7. Shmorgun V. G. et al. Microstructure and phase composition of diffusion coating formed in NiCr alloys by hot-dip aluminizing. *Surfaces and Interfaces*, 2021, vol. 23, pp. 100988.
8. Kyriakopolous A., Lynn M., Ghomashchi R. Reactive interaction of molten aluminum and solid nickel. *Journal of materials science letters*, 2001, vol. 20, no. 18, pp. 1699–1701.
9. Lopez G. A. et al. Phase characterization of diffusion soldered Ni/Al/Ni interconnections. *Interface science*, 2002, vol. 10, pp. 13–19.
10. Okane T. et al. Thermodynamic justification for the Ni/Al/Ni joint formation by a diffusion brazing. *International Journal of Thermodynamics*, 2011, vol. 14, no. 3, pp. 97–105.
11. Schmitz C. (ed.). Handbook of aluminium recycling. Vulkan-Verlag GmbH, 2006.
12. Pohla C., Ryder P. L. Crystalline and quasicrystalline phases in rapidly solidified Al Ni alloys. *Acta materialia*, 1997, vol. 45, no 5, pp. 2155–2166.
13. Tamarin Y. Protective coatings for turbine blades. ASM international, 2002.
14. Bogdanov A. et al. Formation of Thermally Grown Aluminum Oxide Scale on the Surface of Ni₂Al₃/Ni Layered Coating. *Oxidation of Metals*, 2022, vol. 98, no 1–2, pp. 199–216.
15. Shmorgun V. G., Bogdanov A. I., Kulevich V. P. The oxidation behaviour of layered Al-Ni coating at high-temperature heating. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, pp. 1627–1630.

Информация об авторах

А. И. Богданов — кандидат технических наук, доцент;
В. П. Кулевич — кандидат технических наук, преподаватель;
В. Г. Шморгун — доктор технических наук, профессор;
Р. Д. Евчиц — аспирант.

Information about the authors

A. I. Bogdanov — PhD (Engineering), Associate Professor;
V. P. Kulevich — PhD (Engineering), Lecturer;
V. G. Shmorgun — Dr. Sc. (Engineering), Professor;
R. D. Evchits — post-graduate student.

Статья поступила в редакцию 28.01.2023; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.
The article was submitted 28.01.2023; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.