

УДК 621.793.6

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-2-297-17-21

*В. П. Кулевич, А. И. Богданов, В. Г. Шморгун, В. Д. Смоленцев
О. В. Афонина, Е. А. Вакулин, А. А. Шаров*

**КИНЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ ПРИ ЖИДКОСТНОМ АЛИТИРОВАНИИ
СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА И НИКЕЛЯ***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: kulevich.vp@gmail.com

Проведено жидкостное алитирование сплавов на основе железа и никеля (10X11H23T3MP, ХН32Т, ХН45МВТЮБР, ХН50МВТЮБ, ХН65МВ). Построены графические зависимости влияния температурно-временных параметров процесса алитирования на толщину получаемых покрытий. Показано, что увеличение времени выдержки в расплаве алюминия способствует увеличению толщины алюминиевого покрытия до определенного предела, определяемого температурой расплава и химическим составом алитируемого сплава. Увеличение содержания Ni и уменьшение Fe в составе сплавов, а также увеличение количества легирующих элементов способствует увеличению толщины покрытия. Использование ультразвукового воздействия на алитируемый сплав способствует улучшению смачиваемости поверхности и снижению толщины получаемого покрытия.

Ключевые слова: никель, железо, сплавы, алитирование, покрытия

*V. P. Kulevich, A. I. Bogdanov, V. G. Shmorgun, V. D. Smolentsev
O. V. Afonina, E. A. Vakulin, A. A. Sharov*

**KINETICS OF COATING FORMATION DURING LIQUID ALUMINIZING
OF IRON AND NICKEL BASED ALLOYS**

Volgograd State Technical University

Liquid aluminizing of iron- and nickel-based alloys (10Cr11Ni23Ti3MoB, CrNi32Ti, CrNi45MoWTiAlB, CrNi50WMoTiAlB, CrNi65MoW) was carried out. Graphic dependences of the influence of temperature-time parameters of the aluminizing process on the thickness of the resulting coatings were constructed. It was shown that an increase in the holding time in the aluminum melt contributes to an increase in the thickness of the aluminum coating to a certain limit determined by the melt temperature and the chemical composition of the aluminized alloy. Increasing the Ni content and decreasing the Fe content in the alloys, as well as increasing the amount of alloying elements, contributes to increasing the coating thickness. The use of ultrasonic action on the aluminized alloy contributes to improving the wettability of the surface and reducing the thickness of the resulting coating.

Keywords: nickel, iron, alloys, aluminizing, coatings

Введение

Алитирование сплавов является одним из наиболее часто применяемых способов повышения жаростойких характеристик материала. Алюминидные покрытия обеспечивают формирование стабильной оксидной пленки Al_2O_3 на поверхности изделия, которая эффективно сопротивляется высокотемпературному окислению.

Существуют различные подходы к нанесению алюминидных покрытий, включая диффузионное насыщение [1–3], холодное газодинамическое напыление [4–5], алитирование погружением в расплав [6–8] и многие другие [9–10]. Использование метода жидкостного алитирования является одним из наиболее распространенных и простых в реализации, гаранти-

рующих формирование сплошного алюминиевого покрытия по всей поверхности изделия за короткий промежуток времени.

В настоящее время есть множество исследований, которые посвящены алитированию сплавов на основе железа и никеля, как в мировой литературе [11–13], так и проведенных работниками кафедры Материаловедения и композиционные материалы Волгоградского государственного технического университета [14–16].

Несмотря на вышесказанное, практически нет работ, посвященных сравнительному анализу особенностей алитирования сложнолегированных сплавов различного химического состава.

© Кулевич В. П., Богданов А. И., Шморгун В. Г., Смоленцев В. Д., Афонина О. В., Вакулин Е. А., Шаров А. А., 2025.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01245, <https://rscf.ru/project/23-79-01245/>.

Целью настоящей работы является сравнение алюминидных покрытий на сплавах с различным соотношением Fe, Ni и легирующих элементов, полученных методом жидкостного алитирования.

Материалы и методы исследования

Для проведения алитирования были взяты сплавы на основе железа и никеля различного химического состава (10X11H23T3MP, ХН32Т,

ХН45МВТЮБР, ХН50ВМТЮБ, ХН65МВ). Состав сплавов представлен в табл. 1.

Сплавы подбирались из представленных в открытой продаже таким образом, чтобы охватить диапазон возможных соотношений концентраций Ni и Fe. Кроме того, делался акцент на содержании Cr, Mo, W, Ti, Nb, как элементов, которые могут способствовать повышению эксплуатационных характеристик материала.

Таблица 1

Химический состав сплавов (мас. %)

Сплав	Ni	Fe	Cr	Mo	W	Al	Ti	Nb	C	Si	Mn	S	P	B
10X11H23T3MP (ЭП33) ГОСТ 5632-72	21–25	56–63	10–12,5	1–1,6	–	< 0,8	2,6–3,2	–	< 0,1	< 0,6	< 0,6	< 0,01	< 0,025	< 0,02
ХН32Т (ЭП670) ГОСТ 5632-72	30–34	41–51	19–22	–	–	< 0,5	0,25–0,6	–	< 0,05	< 0,7	< 0,7	< 0,02	< 0,03	–
ХН45МВТЮБР (ЭП718) ТУ 14-1-3905-85	43–47	25–33	14–16	4–5,2	2,5–3,5	0,9–1,4	1,9–2,4	0,8–1,5	< 0,1	< 0,3	< 0,6	< 0,01	< 0,015	< 0,008
ХН50ВМТЮБ ЭП648 ТУ 14-1-3046-80	53–60	< 4	32–35	2,3–3,3	4,3–5,3	0,5–1,1	0,5–1,1	0,5–1,1	< 0,1	< 0,4	< 0,5	< 0,01	< 0,015	< 0,008
ХН65МВ ЭП567 ГОСТ 5632-72	59–67	< 1	14,5–16,5	15–17	3–4,5	–	–	–	< 0,03	< 0,15	< 1	< 0,012	< 0,015	–

Для проведения алитирования из подготовленных сплавов вырезали образцы размером 10×20 мм и просверливали в них отверстие для подвешивания на проволоке. Образцы предварительно были отшлифованы на наждачной бумаге зернистостью 320 и обезжирены. В ке-

рамических тиглях расплав алюминия АД1 (табл. 2) нагревали в печи SNOL 8,2/1100 до температуры 700–760 °С. Образцы погружали в расплав, выдерживали 1–10 мин, а затем извлекали с охлаждением на воздухе.

Таблица 2

Химический состав сплава АД1 (вес.%) ГОСТ 4784-2019

Al	Si	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Ti
Ост.	< 0,3	< 0,05	< 0,3	< 0,025	< 0,1	< 0,05	< 0,15

Алитирование погружением в расплав под воздействием ультразвука проводилось с применением ультразвуковой установки. Схема установки включала генератор ультразвука УЗГИ-2, к которому был подключен пьезоэлектрический преобразователь в составе составного ступенчато-конического концентратора ультразвуковых колебаний с присоединенным к нему металлическим волноводом из нержавеющей стали.

Входная мощность генератора, замеренная в процессе его работы, составила ~ 18 Вт. Частота колебаний, подаваемая генератором на пьезоэлектрический преобразователь и замеренная с помощью частотомера ЧЗ-34А, составила 20 кГц, а амплитуда – 5–7 мкм.

Металлографические исследования с измерением толщин покрытий выполняли на оптическом микроскопе Olympus BX61 с программным обеспечением AnalySIS Pro 3.2.

Результаты и их обсуждение

Изменение температурно-временных параметров процесса алитирования показало ниже следующее (рис. 1). Изменение температуры процесса сопровождается изменением толщины получаемого покрытия, объемной доли интер-

металлических фаз и соотношения толщин слоев, из которых состоит покрытие. Фазовый состав покрытия при этом остается неизменным. Увеличение температуры облегчает процесс алитирования и гарантирует более стабильных результат при алитировании партии образцов.

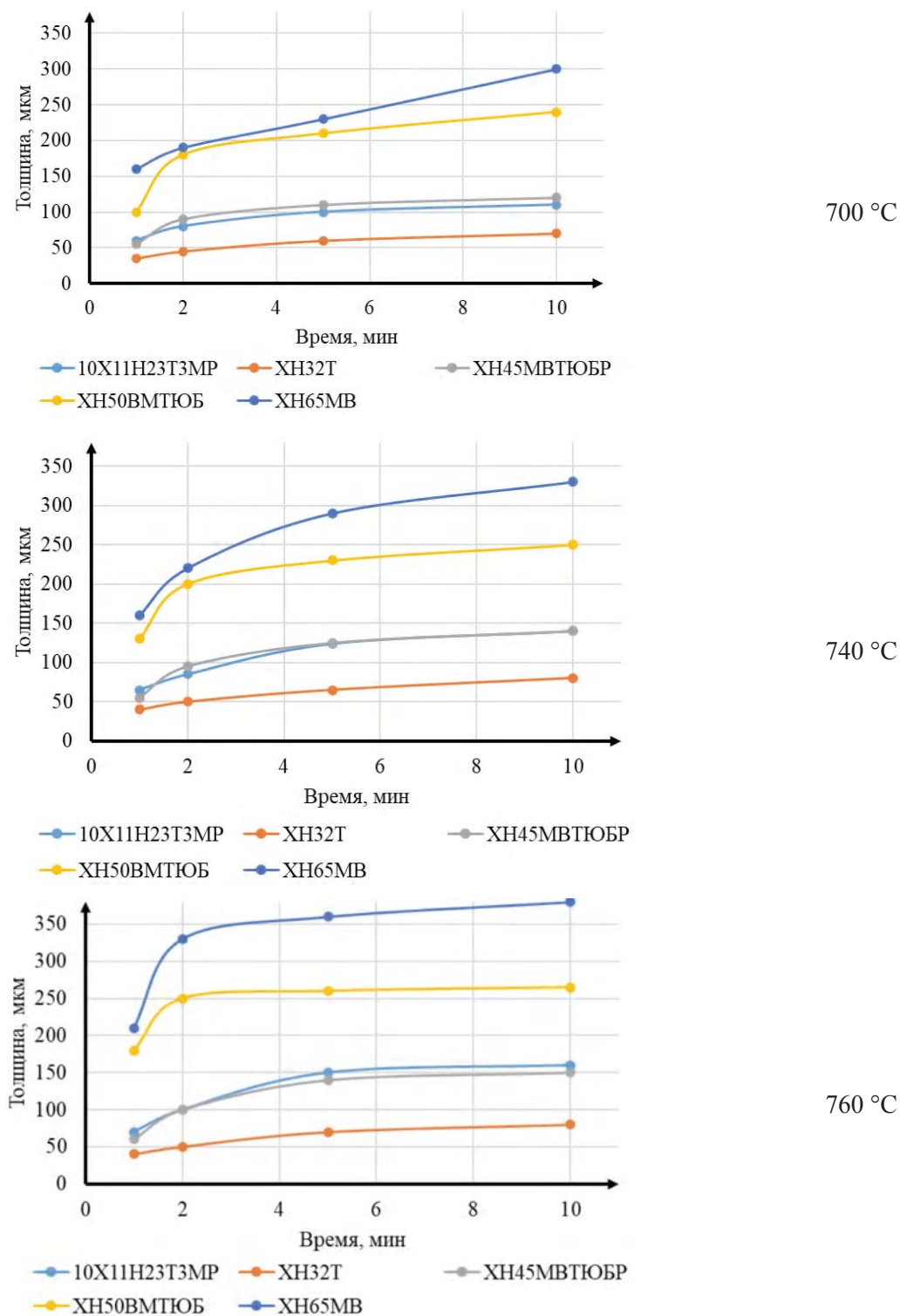


Рис. 1. Температурно-временные зависимости толщины покрытий при алитировании исследуемых сплавов

Изменение времени алитирования сказывается на сплошности получаемого покрытия и на степени растворения материала подложки в расплаве. Так малое время выдержки (<1 мин) может оказаться недостаточным для равномерного смачивания поверхности подложки расплавом и, как следствие, приводит к формированию несплошного дефектного покрытия. Значительное увеличение времени выдержки сопровождается активным растворением материала подложки в расплаве, при этом толщина итогового покрытия практически не изменяется.

Воздействие ультразвука способствовало улучшению качества и сплошности покрытия на малых временах выдержки (до 1 мин). Кроме того, ультразвуковые колебания в процессе

алитирования и извлечения образца из ванны с расплавом способствуют получению более тонкого покрытия. Увеличение времени выдержки более 2 мин приводит к активному растворению образца и крепежа на волноводе, в результате чего образец отделялся и оставался в ванне с расплавом.

Для сплавов 10X11H23T3MP, ХН32Т, ХН45МВТЮБР, на которых изначально формировалось покрытие сравнительно небольшой толщины, ультразвук привел к снижению толщины покрытия менее чем на 10 % (рис. 2). Для сплавов ХН65МВ, ХН50МВТЮБ, на которых изначально получалось достаточно толстое покрытие, ультразвук позволил снизить толщину покрытия примерно на 30 %.

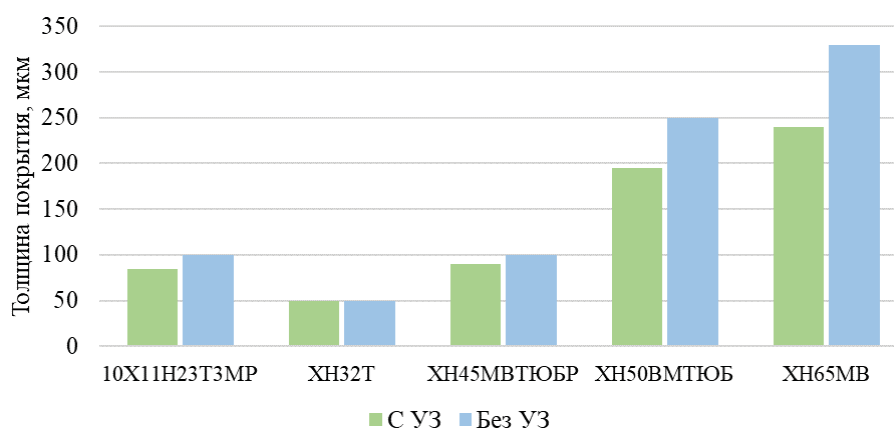


Рис. 2. Влияние ультразвука на толщину покрытий при алитировании погружением в расплав (760 °С, 2 мин)

При алитировании сплавов отмечена тенденция по увеличению толщины формируемого покрытия с увеличением содержания никеля в сплаве. Другие химические элементы в составе сплавов также влияют на толщину алюминиевого покрытия. В частности, минимальное количество дополнительных легирующих элементов способствует снижению толщины покрытия (сплав ХН32Т). Большое содержание Мо наоборот приводит к увеличению толщины покрытия (ХН65МВ).

Выводы

Увеличение времени выдержки в расплаве способствует увеличению толщины алюминиевого покрытия до определенного предела, определяемого температурой расплава и химическим составом алитированного сплава. Дальнейшее увеличение времени алитирования сопровождается растворением подложки в расплаве алюминия без значительного изменения толщины покрытия.

Увеличение содержания Ni и уменьшение Fe в составе сплавов способствует увеличению толщины покрытия. Минимальная толщина алюминиевого покрытия формируется на сплаве с минимальным содержанием легирующих элементов ХН32Т, а максимальная толщина покрытия получена на сплаве с высоким содержанием Мо – ХН65МВ.

Использование ультразвукового воздействия на алитруемый сплав способствует улучшению смачиваемости поверхности и снижению толщины получаемого покрытия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pauletti E., d'Oliveira A. S. C. M. Study on the mechanisms of formation of aluminized diffusion coatings on a Ni-base superalloy using different pack aluminization procedures // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2018. – Т. 36. – №. 4.
2. Cojocar M. O., Branzei M., Druga L. N. Aluminide diffusion coatings on IN 718 by pack cementation // Materials. – 2022. – Т. 15. – №. 15. – С. 5453.

3. *Dejthammarong P. et al.* Modelling of nickel aluminide layer growth on IN 738 and Haynes 214 in pack aluminizing //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2020. – Т. 2279. – №. 1.

4. *Cinca N. et al.* Mechanically induced grain refinement, recovery and recrystallization of cold-sprayed iron aluminide coatings //Surface and Coatings Technology. – 2019. – Т. 380. – С. 125069.

5. *Luo J. et al.* Robust corrosion performance of cold sprayed aluminide coating in ternary molten carbonate salt for concentrated solar power plants //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2022. – Т. 237. – С. 111573.

6. *Dey P. P. et al.* A review on metallurgical features of hot-dip aluminized steel //Engineering Research Express. – 2023. – Т. 5. – №. 1. – С. 012002.

7. *Dey P. P. et al.* A Study on the Phase Formation and Physical Characteristics of Hot-Dip Aluminized Coating at 750° C //Metallography, Microstructure, and Analysis. – 2021. – Т. 10. – С. 823-838.

8. *Abro M. A., Hahn J., Lee D. B.* High temperature oxidation of hot-dip aluminized T92 steels //Metals and Materials International. – 2018. – Т. 24. – С. 507-515.

9. *Sarrafi S. H., Soltanieh M., Rastegari S.* Reactive air aluminizing of a nickel-based superalloy (IN738LC): Coating formation mechanism //Surface and Coatings Technology. – 2023. – Т. 456. – С. 129229.

10. *Mahmoudi H., Hadavi S. M. M., Palizdar Y.* Charac-

terization, growth kinetics and formation mechanism of aluminide coating by plasma paste aluminizing on IN738 // Vacuum. – 2021. – Т. 184. – С. 109968.

11. *Dey P. P. et al.* A review on metallurgical features of hot-dip aluminized steel //Engineering Research Express. – 2023. – Т. 5. – №. 1. – С. 012002.

12. *Yu L. et al.* Effects of aluminizing on the microstructure and wear resistance of AISI 321 steel //Surface and Coatings Technology. – 2024. – Т. 483. – С. 130753.

13. *Копец М.* Recent Advances in the Deposition of Aluminide Coatings on Nickel-Based Superalloys: A Synthetic Review (2019–2023) //Coatings. – 2024. – Т. 14. – №. 5. – С. 630.

14. *Шморгун, В. Г.* Особенности диффузионного взаимодействия в сталеалюминиевом композите после сварки взрывом и алитирования погружением в расплав / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, В. П. Кулевич // Металлург. – 2019. – № 7. – С. 84–89.

15. *Shmorgun V. G. et al.* Kinetics of Phase Transformations in FeAl (Cr, Si)/Fe3Al (Cr, Si)/Fe (Al, Cr, Si) Laminated Coating on the Cr15Al5 Alloy //Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd, 2020. – Т. 992. – С. 493-497.

16. *Kulevich V. P., Bogdanov A. I., Shmorgun V. G.* Aluminizing of the EP33 alloy by hot-dipping // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2024. – Т. 2697. – №. 1. – С. 012058.