СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 620.22

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-10-257-7-11

А. И. Богданов, В. Г. Шморгу́н, В. П. Кулеви́ч, Р. Д. Евчи́ц, Н. В. Терпуго́в

СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОКРЫТИЯ НА СПЛАВЕ ЭП718 ПОСЛЕ ЖИДКОСТНОГО АЛИТИРОВАНИЯ*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: bogdanov@vstu.ru

Приведены результаты исследований структуры, химического и фазового состава алюминидного покрытия, сформированного на поверхности сплава ЭП718 после его алитирования погружением в расплав. Показано, что внутренний слой покрытия состоит из сплошной прослойки твердого раствора на базе алюминиды хрома CrAl_7 с моноклинной решеткой, в которой часть атомов Cr замещена атомами элементов из сплава ЭП718, а внешний, имеющий ярко выраженное гетерогенное строение, представляет собой алюминиевую матрицу с включениями алюминиды CrAl_7 с более низким содержанием алюминия.

Ключевые слова: алитирование, сплав ЭП718, диффузия, покрытие.

A. I. Bogdanov, V. G. Shmorgun, V. P. Kulevich, R. D. Evchits, N. V. Terpugov

STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF COATING ON EP718 ALLOY AFTER HOT-DIP ALUMINIZING

Volgograd State Technical University

The results of studies of the structure, chemical and phase composition of the aluminide coating formed on the surface of EP718 alloy after its hot-dip aluminizing are presented. It is shown that the inner layer of the coating consists of a continuous layer of a solid solution based on chromium aluminide CrAl_7 with a monoclinic lattice, in which some of the Cr atoms are replaced by atoms of elements from the EP718 alloy, and the outer layer, which has a pronounced heterogeneous structure, is an aluminum matrix with inclusions of CrAl_7 aluminide, with a lower aluminum content.

Keywords: hot-dip aluminizing, EP718 alloy, diffusion, coating.

Поверхность деталей газотурбинных авиационных двигателей, энергетических установок, изделий космической техники, изготавливаемых из жаропрочных никелевых сплавов (например, ЭП718 или аналог Inconel 718), часто может кратковременно нагреваться до температур выше 1000°C [1]. В таких условиях, критичной характеристикой, определяющей работоспособность и эксплуатационную надежность деталей, наряду с жаропрочностью, является их жаростойкость.

В большинстве случаев задача повышения жаростойкости жаропрочных никелевых сплавов решается путем нанесения покрытий на основе алюминидов никеля, высокие защитные

свойства которых обусловлены их способностью окисляться с образованием плотной пленки оксида алюминия Al_2O_3 [2].

Среди способов получения алюминидных покрытий наиболее распространены технологии диффузионного насыщения поверхности жаропрочных сплавов алюминием из различных сред [3–8]. Наиболее простым и технологически доступным методом насыщения алюминием является алитирование методом погружения заготовки в расплав [9]. Однако, литературные данные, касающиеся процессов, происходящих при взаимодействии сплава ЭП718 с алюминием в условиях жидкостного алитирования, нами не обнаружены.

© Богданов А. И., Шморгу́н В. Г., Кулеви́ч В. П., Евчи́ц Р. Д., Терпуго́в Н. В., 2021.

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

Целью настоящей работы являлось исследование структуры, химического и фазового состава алюминидного покрытия, формируемого на поверхности сплава ЭП718 после его алитирования погружением в расплав.

Материалы и методы исследования

Алитирование образцов из сплавов марки ЭП718 (табл. 1) размером $10 \times 10 \times 2$ мм осуществляли при их погружении в расплав алюминиевого сплава марки 6063 (табл. 2). Образцы предварительно были отшлифованы на наждачной бумаге и обезжирены.

Для защиты от окисления на их поверхность наносили слой флюса на основе полиэфирной смолы. Для получения расплава навеску сплава марки 6063 массой 100 г нагревали в печи SNOL 8.2/1100 до температуры 740°C в керамическом тигле. Образцы погружали в расплав через слой флюса и выдерживали в течение 2 мин. Далее образцы извлекались из тигля и охлаждались на воздухе. После охлаждения на поверхности сплава формировался алитированный слой (покрытие) толщиной 0,1 мм.

Таблица 1

Химический состав сплава ЭП718 (мас. %)

C	S	P	Mn	Cr	Zr	W	Ti	Si	Ni	Nb	Mo	Fe	Ce	B	Al
$\leq 0,10$	$\leq 0,010$	$\leq 0,015$	$\leq 0,60$	14,00-16,00	$\leq 0,020$	2,50-3,50	1,90-2,40	$\leq 0,30$	43,00-47,00	0,80-1,50	4,00-5,20	Ост.	$\leq 0,10$	$\leq 0,008$	0,90-1,4

Таблица 2

Химический состав алюминиевого сплава марки 6063 (мас. %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.3-0.6	0.15-0.35	0.10	0.15	0.60-0.90	0.05	0.15	0.10	Ост.

Электроннооптические 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 ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). В качестве монохроматора на первичном пучке устанавливалось зеркало Гебеля. Регистрация дифракционной картины осуществлялась с помощью позиционно-чувствительного детектора SSD160. Съемку производили коллимированным (диаметр 1 мм) пучком рентгеновского излучения с алитированной

поверхности, которую предварительно шлифовали на наждачной бумаге для удаления оксидного слоя. Микродюретрические исследования проводили на приборе PMT-3М.

Результаты и их обсуждение

Металлографические исследования показали, что в результате взаимодействия жаропрочного сплава ЭП718 с расплавленным алюминием на поверхности первого формируется диффузионный слой (покрытие) толщиной ~ 100 мкм. Поры и трещины в покрытии не визуализируются (рис. 1).

Рис. 1. СЭМ изображения структуры покрытия на поверхности сплава ЭП718 после алитирования

Структура покрытия имеет ярко выраженное гетерогенное строение, которое характеризуется значительной неоднородностью. Причем, можно выделить два характерных слоя: внешний слой глубиной ~75 мкм, представляющий собой темную матрицу с большим количеством светлых включений округлой формы размером ~2–30 мкм, и внутренний слой ~35 мкм на границе со сплавом. Расчетная доля светлых включений в объеме закристаллизовавшегося расплава для верхнего слоя покрытия составляет 45–48 %. Микродюрметрические исследования показали, что их микротвердость составляет ~4,37 ГПа.

Структура внутреннего слоя покрытия имеет более однородный вид, хотя здесь и присутствуют области темных включений. В непосредственной близости к границе соединения присутствует сплошной светлый визуально однородный слой толщиной ~2,5 мкм.

Ввиду неоднородности и малых размеров элементов структуры покрытия, анализ его химического состава проводили ЭДС сканированием в точечном режиме (соответствующие точки см. на рис. 1, б). Полученные эмиссионные спектры приведены на рис. 2, а результаты их обработки сведены в табл. 3.

Рис. 2. Эмиссионные спектры, полученные при точечном анализе химического состава покрытия (точки сканирования указаны на рис. 1, б)

Таблица 3

Результаты точечного ЭДС анализа состава покрытия

Анализируемая точка (см. рис. 1, б)	Содержание элемента, ат. %						
	Al	Cr	Fe	Ni	Mo	Ti	W
1	88,97	4,95	2,91	1,55	1,07	0,56	—
2	100	—	—	—	—	—	—
3	86,98	7,02	2,85	1,08	1,26	0,8	—
4	81,16	5,17	5,31	5,17	0,9	0,68	1,61

Исходя из полученных данных, можно заключить, что внешний слой состоит из закристаллизовавшейся алюминиевой матрицы и включений сложного состава ~87–89 ат. % Al,

~5–7 ат. % Cr, ~3 ат. % Fe, ~1–1,5 ат. % Ni ~1 ат. % Mo и ~0,5–0,8 ат. % Ti. Растворимость Cr в Al согласно диаграмме состояния не превышает 0,1 ат. % при 300 °С и 0,45 ат. % при тем-

пературе 661,4 °С, поэтому образование твердого раствора внедрения на базе ГЦК-решетки алюминия маловероятно даже с учетом влияния неравновесности кристаллизации. Указанный состав включений, наиболее вероятно, соответствует твердому раствору на базе алюминидов хрома CrAl_7 (иначе обозначается как θ -фаза $\text{Cr}_7\text{Al}_{45}$) с моноклинной решеткой, в которой часть атомов Cr замещена атомами элементов из сплава ЭП718. Такое предположение под-

тверждается результатами рентгеноструктурного анализа (рис. 3). На дифрактограмме, помимо рефлексов алюминия, присутствует набор рефлексов, отвечающий стандарту карточки PDF #03-065-6844 для соединения $\text{Cr}_7\text{Al}_{45}$. При этом рефлексы системно смещены относительно положений стандарта, что может свидетельствовать о формировании твердого раствора на базе интерметаллидного соединения.

Рис. 3. Дифрактограмма, полученная с поверхности покрытия

При идентичном фазовом составе для тонкого сплошного слоя на границе со сплавом ЭП718 характерно более низкое содержание алюминия ~81 ат. % Al и более равномерное содержание основных элементов - по ~5 ат. % Cr, Fe и Ni, при этом появляются эмиссионные линии, соответствующие спектру вольфрама (рис. 2, точка 4).

Полученный результат показывает принципиальную возможность получения в поверхностном слое жаропрочного сплава ЭП718 диффузионного покрытия интерметаллидного состава на базе твердого раствора на основе алюминидов хрома CrAl_7 . Очевидно, что формируемые в условиях быстрой кристаллизации состав и структура покрытия требуют проведения стабилизирующей термической обработки.

Вывод

В результате алитирования сплава ЭП718 в жидком алюминии на его поверхности формируется сплошное, равномерное по толщине

покрытие без дефектов в виде пор и трещин. Покрытие имеет гетерогенную структуру. Его внутренний слой состоит из сплошной прослойки твердого раствора на базе алюминидов хрома CrAl_7 с моноклинной решеткой, в которой часть атомов Cr замещена атомами элементов из сплава ЭП718, а внешний, имеющий ярко выраженное гетерогенное строение, представляет собой алюминиевую матрицу с включениями алюминидов CrAl_7 с более низким содержанием алюминия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Y. Tamarin, Protective Coatings for Turbine Blades, ASM International, Materials Park, 2002.
2. Pöttgen, R. Intermetallics : Synthesis, Structure, Function/ Rainer Pöttgen, Dirk Johrendt.-Walter de Gruyter GmbH Berlin/Boston.- 2014.- 294 p.
3. Sitek, R. & Matysiak, H. & Ferenc, Jaroslaw & Kurzydowski, K.J. (). Structure and properties of nickel aluminide layers on INCONEL 100. Materials Science Forum, 2010, 636-637, 1011-1018.
4. Zagula-Yavorska, Maryana & Sieniawski, Jan & Zielińska, M. Functional Properties of Aluminide Layer Deposit-

ed on Inconel 713 LC Ni-based Superalloy in the CVD Process. Archives of Metallurgy and Materials, 2011, 56, 187-192.

5. *Tagliaferri L, Berretti E, Giaccherini A, Martinuzzi SM, Bozza F, Thoma M, Bardi U, Caporali S.* Aluminizing via Ionic Liquid Electrodeposition and Pack Cementation: A Comparative Study with Inconel 738 and a CoNiCrAlY. Coatings, 2017,7(6):83.

6. *Bozza, F., Bolelli, G., Giolli, C., Giorgetti, A., Lusvarghi, L., Sassatelli, P., Scrivani, A., Candeli, A., & Thoma, M.D.* (2014). Diffusion mechanisms and microstructure development in pack aluminizing of Ni-based alloys. Surface & Coatings Technology, 2014, 239, 147-159.

7. *Moosa, Ahmed & Ahmed, Jalil & Hobi, Ali.* Corrosion Properties of Inconel Alloy 600 Coated by Simultaneous Aluminizing-Chromizing Process. Materials Science Forum. 2007, Vols. 546-549, 1763-1768.

8. *Döleker, K. M., Erdogan, A., Yener, T., Karaoglanlı, A. C., Uzun, O., Gök, M. S., & Zeytin, S.* Enhancing the wear and oxidation behaviors of the Inconel 718 by low temperature aluminizing. Surface and Coatings Technology, 2021, 412, 127069.

9. *V.G. Shmorgun, A.I. Bogdanov, V.P. Kulevich, L.D. Iskhakova, A.O. Taube,* Microstructure and phase composition of diffusion coating formed in NiCr alloys by hot-dip aluminizing, Surfaces and Interfaces, 2021, Volume 23, 100988.