Оригинальная статья

УДК 669.58: 621.45.038.72

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-93-101

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВРЕМЕНИ ВЫДЕРЖКИ В РАСПЛАВЕ НА МИКРОСТРУКТУРУ И ФАЗОВОЕ СТРОЕНИЕ ПОКРЫТИЯ Zn + 7 % Al НА СТАЛЯХ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК

© 2025 г. О. С. Бондарева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

Аннотация. Алюминий является одним из самых распространенных легирующих элементов для цинкового расплава. Сплавы с содержанием 1 – 20 % Al демонстрируют высокую формуемость, пластичность и коррозионную стойкость. Известно, что в присутствии алюминия на границе раздела между расплавленным цинком и железной подложкой образуются интерметаллиды Fe – Al, которые играют роль диффузионного барьера, контролируя реакцию между железом и расплавленным цинком, обеспечивая меньшую толщину покрытия по сравнению с традиционными цинковыми покрытиями. Влияние температуры, времени выдержки и химического состава стали на структуру и фазовый состав цинк-алюминиевых покрытий изучено недостаточно. Было проведено исследование микроструктуры и фазового состава покрытий, полученных в расплаве Zn + 7 % Al при температуре 420 – 520 °С с временем выдержки до 8 мин, на сталях различного состава. Установлено, что время выдержки в расплаве не влияет на толщину покрытия. Последняя не зависит от марки стали, следовательно, покрытия Zn + 7 % Al нереактивны по отношению к кремнию, содержащемуся в стали. Показано, что толщина покрытия постоянна в диапазоне 420 – 460 °С и интенсивно возрастает при температуре расплава выше 480 ºС, что связано с интенсивным растворением стальной подложки. Методом электронной микроскопии изучена микроструктура покрытия при температурах 420, 480, 520 °С. Рентгенофазовый анализ позволил установить изменение фазового состава покрытия при повышении температуры расплава. С помощью энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа определен состав отдельных структурных составляющих покрытия. Измерена микротвердость фаз покрытия.

Ключевые слова: горячее цинкование, покрытие Zn – Al, Гальфан, система Zn – Fe – Al, микроструктура покрытия, фазовое строение, микротвердость

Для цитирования: Бондарева О.С. Влияние температуры и времени выдержки в расплаве на микроструктуру и фазовое строение покрытия Zn + 7 % Al на сталях различных марок. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):93–101. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-93-101*

Original article

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND HOLDING TIME IN THE MELT ON THE MICROSTRUCTURE AND PHASE STRUCTURE Zn + 7 % Al COATINGS ON VARIOUS GRADES OF STEEL

© 2025 O. S. Bondareva

Samara National Research University (34 Moskovskoe route, Samara, 443086, Russian Federation)

Abstract. Aluminum is one of the most common alloying elements for zinc melt. Alloys with a content of 1 – 20 % Al exhibit high formability, ductility, and corrosion resistance. It is known that in the presence of aluminum, Fe – Al intermetallides are formed at the interface between molten zinc and an iron substrate, which play the role of a diffusion barrier, controlling the reaction between iron and molten zinc, providing a lower coating thickness compared to traditional zinc coatings. The effect of temperature, exposure time, and chemical composition of steel

on the structure and phase composition of zinc-aluminum coatings has not been sufficiently studied. A study of the microstructure and phase composition of coatings obtained in a Zn + 7 % Al melt at a temperature of 420 – 520 °C with a holding time of up to 8 minutes on steels of various compositions was carried out. It was found that the exposure time in the melt does not affect the thickness of the coating. The latter does not depend on the steel grade, therefore, Zn + 7 % Al coatings are non-reactive with respect to silicon contained in steel. It is shown that the coating thickness is constant in the range of 420 – 460 °C and increases intensively at a melt temperature above 480 °C, which is associated with intensive dissolution of the steel substrate. The microstructure of the coating was studied by electron microscopy at temperatures of 420, 480, and 520 °C. X-ray phase analysis made it possible to establish a change in the phase composition of the coating with increasing melt temperature. The composition of the individual structural components of the coating was determined using energy-dispersive X-ray microanalysis. The microhardness of the coating phases was measured.

Keywords: hot-dip galvanizing, Zn – Al coating, Galfan, Zn – Fe – Al system, coating microstructure, phase structure, microhardness

For citation: Bondareva O.S. Effect of temperature and holding time in the melt on the microstructure and phase structure of the Zn + 7 % Al coating on steels of various grades. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):93–101. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-93-101*

Введение

Развитие горячего цинкования в последние десятилетия неразрывно связано с легированием цинкового расплава различными добавками для повышения коррозионной стойкости покрытия, контроля его толщины и структуры. Алюминий является одним из самых распространенных легирующих элементов для цинкового расплава [1]. Добавки до 0,005 % Al используются для осветления покрытия, а до 0,06 % Al – для контроля роста толщины покрытия при серийном цинковании [2]. При содержании 0,1 – 0,2 % Al на границе раздела между расплавленным цинком и подложкой железа образуются интерметаллиды Fe – Al, которые играют роль диффузионного барьера, контролируя тем самым последующие реакции между железом и расплавленным цинком [3]. В цинковых ваннах, содержащих 1 – 20 % Al, на поверхности железа образуется слой, имеющий структурный изоморфизм с соединением $FeAl_3$ [4]. В работах [5; 6] идентифицировали ингибирующий слой как Zn-содержащий интерметаллид Fe_2Al_5, толщина которого увеличивается с ростом концентрации алюминия в цинковой ванне.

В 1980-х гг. для непрерывного цинкования листа и проволоки был внедрен сплав на основе цинка, содержащий 5 % алюминия и 0,05 % мишметалла (ММ), который получил название Galfan. Покрытия из этого сплава на стали демонстрируют более высокие пластичные свойства, чем у обычных горячих цинковых покрытий [7]. Отмечается, что присутствие алюминия в цинковом покрытии повышает его коррозионную стойкость [8]. Это связано с тем, что в покрытии содержатся интерметалиды FeAl, обладающие высокой коррозионной стойкостью [9; 10]. При эксплуатации изделий на поверхности покрытия формируются защитные слои из оксидов и гидрокарбонатов цинка и алюминия [11; 12]. Однако внедрение расплавов цинка с содержанием алюминия более 0,25 % в отрасли погружного цинкования затруднено из-за того, что традиционный флюс для горячего цинкования $ZnCl_2 – NH_4Cl$ не обеспечивает удовлетворительной смачиваемости изделий расплавом и требуется подбор новых многокомпонентных составов флюсов. Исследования влияния технологических параметров на формирование цинк-алюминиевых покрытий при погружном цинковании очень малочисленны. Практически единственная работа по исследованию влияния температуры и продолжительности горячего погружения на микроструктуру и свойства покрытий Zn – 5 % Al была проведена для низкоуглеродистой (0,05 %) и низкокремнистой (0,008 %) стали St13 [13]. В то время как представляет интерес образование цинк-алюминиевых покрытий на сталях различных марок. Известно, что химический состав стали, особенно содержание в ней кремния, оказывает влияние на толщину покрытия, получаемого горячим цинкованием в расплаве чистого цинка [14].

Целью настоящей работы было исследование микроструктуры и фазового состава покрытий, полученных в расплаве Zn +7 % Al при температуре 420 – 520 °C с временем выдержки до 8 мин для сталей различного состава.

Методы исследования и оборудование

Покрытие наносили на плоские стальные образцы размерами 50 × 50 × 3 мм из стали марок С235, Ст3сп, 09Г2С, 10ХСНД. С помощью оптико-эмиссионного анализатора Foundry-Master XPR определяли химический состав образцов (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав образцов

Table 1. **Chemical composition of the samples**

Марка стали	Содержание, %, элементов в стали										
	Fe	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	W
С235	99,46	0,14	0,02	0,35	0,03	–	–	–	–	–	–
Ст3сп	99,17	0,18	0,23	0,41	0,01	–	0,04	0,03	–	–	–
09Г2С	97,53	0,14	0,59	1,65	0,01	0,04	0,03	0,01	–	–	–
10ХСНД	96,11	0,10	0,87	0,50	0,01	0,74	0,03	0,86	0,02	0,68	0,08

Для получения покрытия образцы подвергали щелочному обезжириванию, травлению в 10 %-ой соляной кислоте и флюсованию в разработанном составе флюса (28.12.2024 г. подана заявка на патент № 2024140243), а затем погружали в расплав цинка, содержащий 7 % Al. Температурный диапазон расплава составлял 410 – 520 °С, время цинкования 1 – 8 мин. Толщину покрытия определяли с помощью магнитного толщиномера. Микроструктурные исследования проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA SB. Элементный микроанализ структурных компонентов покрытия определяли с помощью приставки энергодисперсионного спектрального (ЭДС) микроанализа OXFORD INCA x-act. Рентгенофазовый анализ (РФА) покрытия проводили на рентгеновском дифрактометре Дрон-7 в Cu-K_α излучении. Идентификацию фаз проводили по базе Международного центра дифракционных данных ICDD PDF2. Микротвердость структурных составляющих покрытия измеряли на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой 50 г.

Обсуждение результатов

Расплав Zn + 7 % Al имеет температуру плавления около 390 °С, поэтому рабочая температура расплава составляет около 410 – 420 °С. Установлено, что увеличение времени выдержки изделий в расплаве с 1 до 8 мин не влияет толщину покрытия и составляет в среднем 12,5 мкм (рис. 1).

Толщина покрытия Zn + 7 % Al на сталях различных марок представлена на рис. 2. Выбранные марки стали отличаются по содержанию кремния, который для традиционных горячих цинковых покрытий является реактивным элементом, ускоряющим диффузию между железом и цинком, приводящим к росту толщины покрытия.

Установлено, что толщина покрытия на всех исследуемых марках стали составила 11 – 13 мкм, следовательно, покрытие Zn + 7 % Al нечувствительно по отношению к кремнию, содержащемуся в стали. Изменение толщины покрытия Zn + 7 % Al с ростом температуры расплава приведено на рис. 3.

При температуре цинкования 410 – 460 °С толщина покрытия постоянна (10 – 14 мкм), поверхность покрытия гладкая (рис. 4, *а*). Однако при температуре 480 °С средняя толщина покрытия составила 35 – 40 мкм, кроме того появились локальные утолщения в виде крупинок 110 – 120 мкм (рис. 4, *б*). При дальнейшем повышении температуры до 520 °С наблюдается интенсивный рост толщины покрытия до 200 мкм. Поверхность покрытия имеет зеренную структуру (рис. 4, *в*). Рост толщины покрытия связан с изменением его структуры и фазового состава.

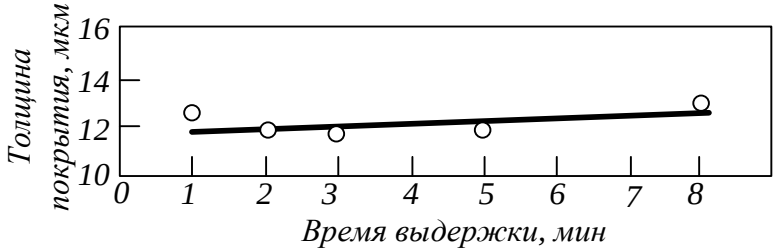


Рис. 1. Влияние времени выдержки в расплаве при температуре 410 – 420 °С на толщину покрытия Zn + 7 % Al
Fig. 1. Effect of the holding time in the melt at a temperature of 410-420 ° C on the coating thickness of Zn + 7 % Al

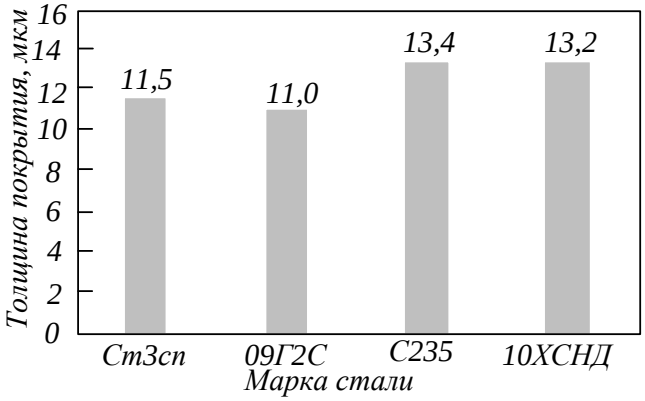


Рис. 2. Толщина покрытия Zn + 7 % Al на различных сталях
Fig. 2. Thickness of Zn + 7 % Al coating on different grades of steel

Рентгенофазовый анализ показал, что в покрытии, полученном при температуре 420 °С, обнаружены фазы цинка и алюминия. Покрытие, полученное при температуре 520 °С, в основном представлено интерметаллидом Fe_2Al_5 и цинком (рис. 5).

Микроструктура покрытия, полученного при температурах 420, 480 и 520 °С, и ЭДС-анализ структурных составляющих приведен в табл. 2 – 4.

Энергодисперсионный и рентгенофазовый анализы позволили установить, что покрытие, полученное при температуре 420 °С, представляет собой тонкий слой интерметаллида $Fe_2Al_5Zn_x$ и расположенную поверх него Zn – Al эвтектику (5 % Al, 3 % Fe и 92 % Zn) с включениями зерен твердого раствора 28 % Al, 3 % Fe в цинке, что соответствует бинарной системе Zn – Al (рис. 6) [15].

При температуре расплава 480 °С на покрытии образуется дефект в виде крупинок. Исследования показали, что в поперечном сечении дефекта есть области различного строения. Был проведен элементный анализ структурных составляющих покрытия. Результаты элементного анализа приведены в табл. 4.

Можно отметить, что дефект представляет собой интерметаллид, содержащий около 55 % Al, 33 % Fe и 12 % Zn, окруженный фазами бездефектного цинк-алюминиевого покрытия. Качественное распределение элементов показано на рис. 7. На картировании хорошо заметно, что интерметаллид образовался на границе стальная подложка – покрытие в результате растворения стальной подложки.

Покрытие, полученное при температуре 520 °С, имеет слоистое строение, где слои фазы $Fe_2Al_5Zn_x$ чередуются с Zn – Al эвтектикой (табл. 4).

Полученные данные согласуются с диаграммой состояния Zn – Al – Fe (рис. 8) [16; 17].

При увеличении температуры выше 480 °С начинается интенсивное растворение железа и образование тройного интерметаллида η-$Fe_2Al_5Zn_x$.

Микротвердость зерен твердого раствора алюминия в цинке и эвтектической смеси алю-

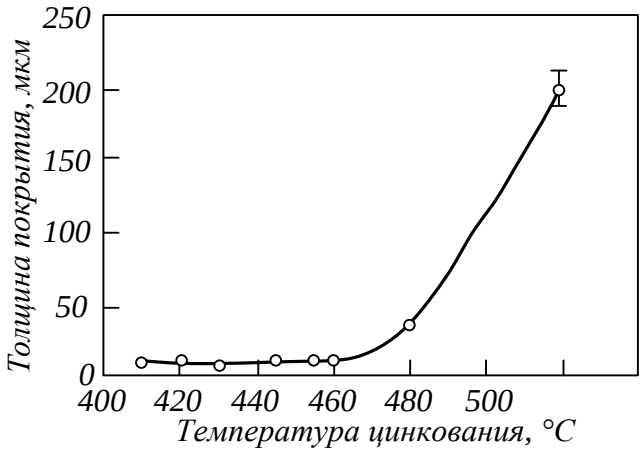


Рис. 3. Влияние температуры цинкования на толщину покрытия
Fig. 3. Effect of galvanizing temperature on coating thickness

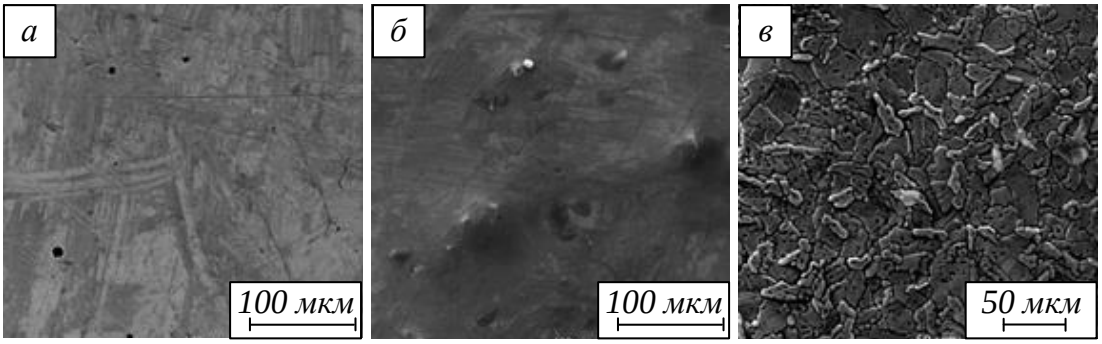


Рис. 4. Поверхность покрытия, полученного в расплаве при температуре 420 (*а*), 480 (*б*) и 520 °С (*в*)
Fig. 4. Surface of the coating obtained in the melt at a temperature of 420 (*а*), 480 (*б*) and 520 °С (*в*)

миния и цинка составила 120 HV_{50}, а интерметаллидных слоев фазы $Fe_2Al_5Zn_x$ около 204 HV_{50}.

Выводы

С увеличением времени выдержки изделий в расплаве с 1 до 8 мин при рабочей температуре 420 °С толщина покрытия не меняется и составляет в среднем 12,5 мкм. Покрытия Zn + 7 % Al имеют одинаковую толщину на всех исследуемых сталях, то есть нечувствительны по отношению к кремнию, содержащемуся в стали. Температура цинкования в диапазоне 410 – 460 °С не оказывает существенного влияния на толщину покрытия, которая составляет 8 – 15 мкм. Микроструктура покрытия представляет собой тонкий слой интерметаллида Fe_2Al_5 и расположенную поверх него Zn – Al эвтектику (около 5 % Al, 3 % Fe и 92 % Zn) с включениями зерен твердого раствора 28 % Al, 3 % Fe в цинке, что соответствует бинарной системе Zn – Al. Средняя толщина покрытия, полученного при температуре 480 °С, составляет 35 – 40 мкм, кроме того появляются локальные утолщения в виде крупинок толщиной 110 – 120 мкм. Этот дефект образуется в результате растворения стальной

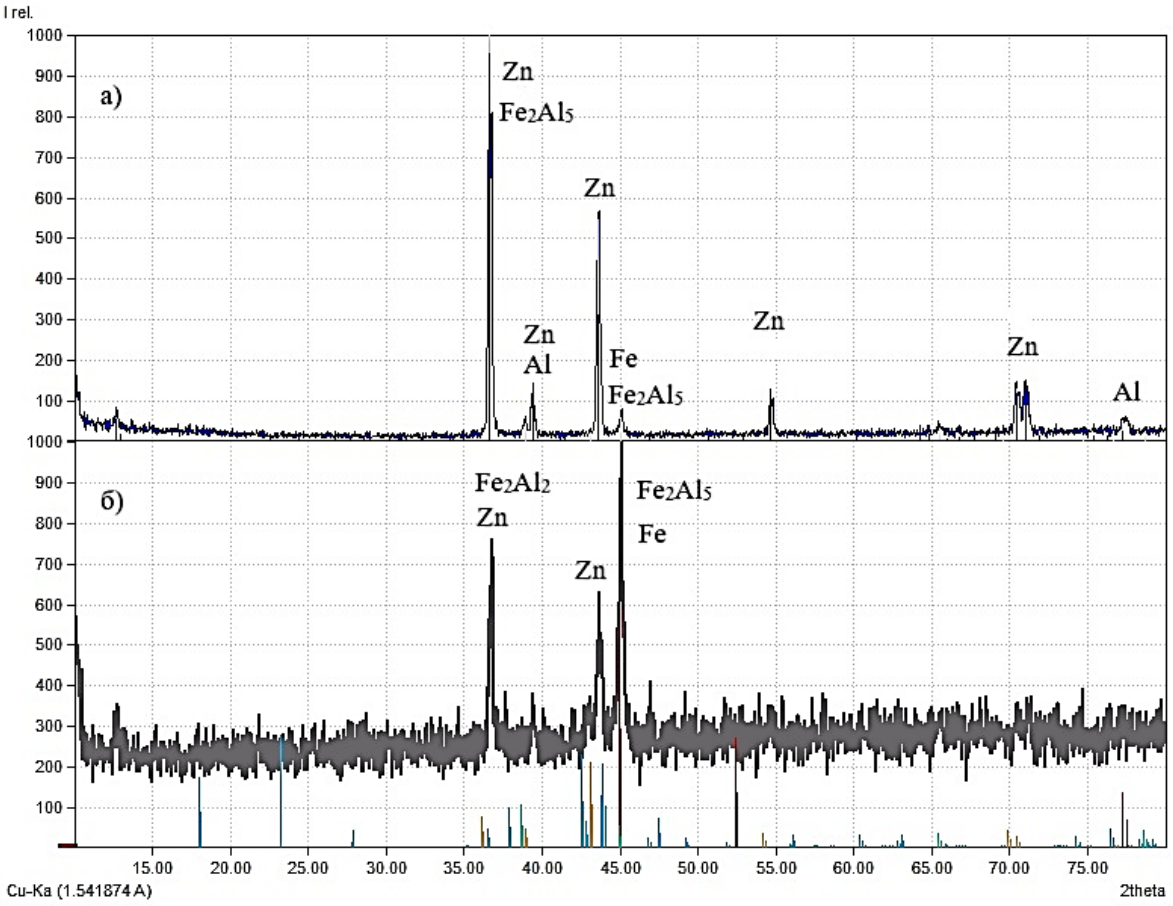
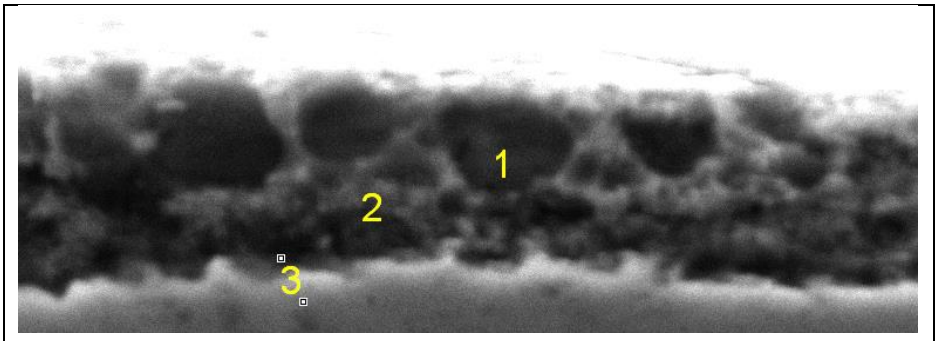


Рис. 5. Дифрактограммы покрытия Zn + 7 % Al, полученного при при температуре 420 (*а*) и 520 °С (*б*)
Fig. 5. Diffraction patterns of the Zn+7%Al coating obtained at 420 (*а*) and 520 °С (*б*)

Таблица 2.

ЭДС-анализ фазовых слоев в поперечном сечении покрытия Zn + 7 % Al, полученного в расплаве при температуре цинкования 420 °С
Table 2. **EMF analysis of phase layers in the cross section of a Zn + 7% Al coating obtained in a melt at a galvanizing temperature of 420 °C**



Точка анализа	Al, %	Fe, %	Zn, %	Итог	Фаза
1	4,49	2,85	92,66	100	Эвтектика Zn/Al
2	20,36	3,81	75,83	100	Тв. р-р Zn(Al)
3	26,27	32,80	40,93	100	$Fe_2Al_5Zn_X$

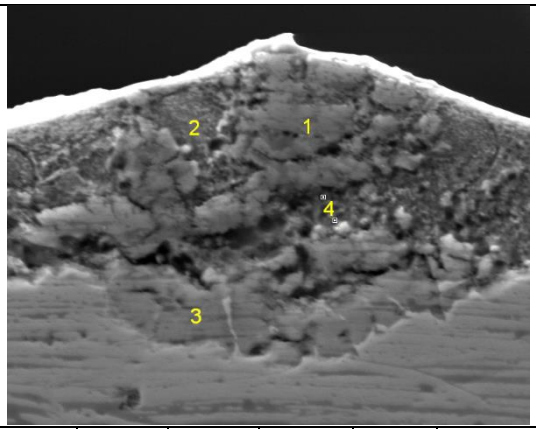
Подложки. Он представляет собой интерметаллид $Fe_2Al_5Zn_x$, содержащий около 55 % Al, 33 % Fe и 12 % Zn, окруженный фазами бездефектного цинк-алюминиевого покрытия. При температуре расплава 520 °С наблюдается резкое увеличение толщины покрытия до 200 мкм. Поверхность покрытия становится зернистой и неоднородной. В поперечном сечении покрытие имеет слоистое строение, где слои фазы η-$Fe_2Al_5Zn_x$ чередуются с Zn – Al эвтектикой. Микротвердость зерен твердого раствора алюминия в цинке и эвтектики составила 120 HV_{50}, а интерметаллидных слоев фазы $Fe_2Al_5Zn_x$ около 204 HV_{50}.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen Z.W. et al. Technigalva and other developments in batch hot-dip galvanizing. *JOM*. 1992;44(1):22–26. *https://doi.org/10.1007/BF03222746*
2. Бондарева О.С., Добычина О.С. Обзор систем легирования цинкового расплава для погружного горячего цинкования. *Черные металлы*. 2022;(12):76–85. *https://doi.org/10.17580/chm.2022.12.11*.

Таблица 3

ЭДС-анализ фазовых слоев в поперечном сечении покрытия Zn + 7 % Al, полученного в расплаве при температуре цинкования 480 °С
Table 3. **EMF analysis of phase layers in the cross section of a Zn + 7% Al coating obtained in a melt at a galvanizing temperature of 480 °C**

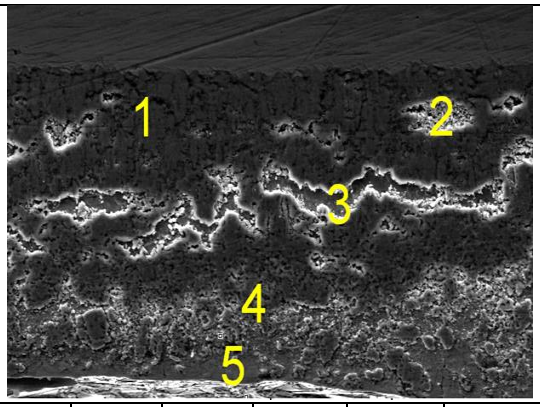


Точка анализа	Al, %	Fe, %	Zn, %	Итог	Фаза
1	55,70	32,58	11,73	100	$Fe_2Al_5Zn_X$
2	1,45	1,22	97,34	100	Эвтектика Zn/Al
3	53,28	38,03	8,69	100	Тв. р-р Zn(Al)
4	5,22	3,42	91,36	100	$Fe_2Al_5Zn_x$

Таблица 4

ЭДС-анализ фазовых слоев в поперечном сечении покрытия Zn + 7 % Al, полученного в расплаве при температуре цинкования 520 °С

Table 4. **EMF analysis of phase layers in the cross section of a Zn + 7% Al coating obtained in a melt at a galvanizing temperature of 520 °C**



Точка анализа	Al, %	Fe, %	Zn, %	Итого	Фаза
1	45,82	36,16	18,02	100	$Fe_2Al_5Zn_x$
2	43,32	30,35	26,32	100	$Fe_2Al_5Zn_x$
3	7,17	3,20	89,63	100	Эвтектика Zn/Al
4	41,43	16,52	42,05	100	$Fe_2Al_5Zn_x$
5	1,18	0,30	98,52	100	Тв. р-р Zn(Al)

3. Kato T. et al. Formation of the ζ phase at an interface between an Fe substrate and a molten 0.2 mass % Al – Zn during galvannealing. *Acta Mater*. 2000;48(9):2257–2262. *https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00037-9*

4. Shawki S., Hamid Z.A. Effect of aluminium content on the coating structure and dross formation in the hot-dip galvanizing process. *Surf. Interface Anal*. 2003;35(1)2:943–947. *https://doi.org/10.1002/sia.1608*

5. Min T. et al. Effects of aluminum concentration on the formation of inhibition layer during hot-dip galvanizing. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018;127:394–402. *https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.016*

6. Khaliq A. et al. Iron Intermetallic Compounds (IMCs) Formation Mechanism in the Molten Aluminium Zinc (Al-Zn) Coating Alloy: 2. *Teh. Vjesn.-Tech. Gaz.* 2024; 31(2). *https://doi.org/10.17559/TV-20230523000660*

7. Khezrloo A. et al. Effect of coating parameters on microstructure, corrosion behavior, hardness and formability of hot-dip Galfan and galvanized coatings. *Int. J. Mater. Res*. 2021;112(4):321–332. *https://doi.org/10.1515/ijmr-2020-7991*

8. Mendala J. Influence of the cooling method on the structure of 55AlZn coatings. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng*. 2011;22:012004. *https://doi.org/10.1088/1757-899X/22/1/012004*

9. Fornalczyk A., Cebulski J., Dorota P. The Morphology of Corrosion Products in FeAl Alloys after Heat-Resistance Tests at Different Temperatures. *Solid State Phenom*. 2015;227;409–412. *https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.227.409*

10. Kania H., Komorowski L. The Influence of the Chemical Composition of a Zinc Bath upon Corrosion Resistance of Coatings Obtained on Sebisty Steel. *Solid State Phenom*. 2016;246:85–90. *https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.246.85*

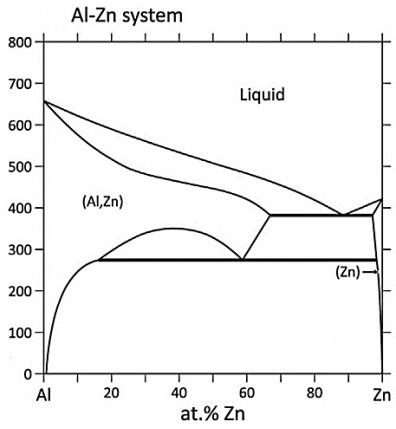


Рис. 6. Фазовая диаграмма Zn – Al [15]
Fig. 6. Phase diagram of the Zn – Al system [15]

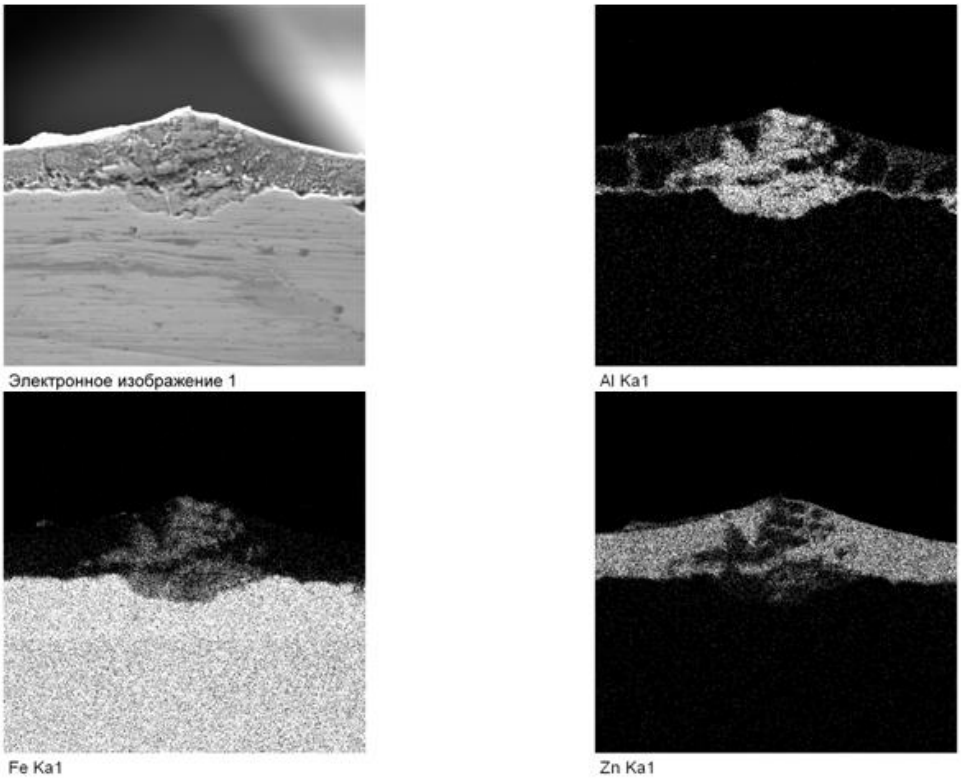


Рис. 7. Распределение элементов по площади поперечного сечения дефекта покрытия, полученного при температуре цинкования 480 °С
Fig. 7. Distribution of elements by the cross-sectional area of the coating defect obtained at a galvanizing temperature of 480 °C

11. Zhang X., Leygraf C., Odnevall Wallinder I. Atmospheric corrosion of Galfan coatings on steel in chloride-rich environments. *Corros. Sci*. 2013;73:62–71. *https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.03.025*

12. Zhu X. et al. Effect of Hot Dip Plating Process Parameters on Microstructure and Properties of Zinc – 10 % Aluminum – Mischmetal Alloy Coated for Bridge Cable Steel Wire. *Metals*. 2022;12(8):1257. *https://doi.org/10.3390/met12081257*

13. Mesbahzadeh A. et al. Interfacial Investigation of St13/Molten Zn – 5 % Al and Corrosion Behavior of Formed Layer via Hot-Dip Process. *Surf. Eng. Appl. Electrochem*. 2021;57(1):124–135. *https://doi.org/10.3103/S1068375521010087*

14. Han S.-C. et al. Role of silicon on formation and growth of intermetallic phases during rapid Fe – Zn alloying reaction. *Mater. Today Adv*. 2023;18:100368. *https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2023.100368*

15. Lee I. et al. Experimental determination of phase diagram at 450 °C in the Zn–Fe–Al ternary system. *J. Alloys Compd*. 2021;854:157163.

16. Ghosh G., Palm M. Al-Fe-Zn Ternary Phase Diagram Evaluation. *MSI Eureka*. 2023;96:10.17658.4.5. *https://doi.org/10.7121/msi-eureka-10.17658.4.5*

17. Tang N.-Y., Su X. On the ternary phase in the zinc-rich corner of the Zn-Fe-Al system at temperatures below 450 °C. *Metall. Mater. Trans. A*. 2002;33(50):1559–1561. *https://doi.org/10.1007/s11661-002-0078-5*

REFERENCES

1. Bondareva O.S., Dobychina O.S. Review of zinc melt alloying systems for immersion hot-dip galvanizing. *Chernye metally*. 2022;(12):76–85. (In Russ.). *https://doi.org/10.17580/chm.2022.12.11*.

2. Chen Z.W. et al. Technigalva and other developments in batch hot-dip galvanizing. *JOM*. 1992;44(1):22–26. *https://doi.org/10.1007/BF03222746*

3. Kato T. et al. Formation of the ζ phase at an interface between an Fe substrate and a molten 0.2 mass % Al – Zn during galvannealing. *Acta Mater*. 2000;48(9):2257–2262. *https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00037-9*

4. Shawki S., Hamid Z.A. Effect of aluminium content on the coating structure and dross formation in the hot-dip galvanizing process. *Surf. Interface Anal*. 2003;35(1)2:943–947. *https://doi.org/10.1002/sia.1608*

5. Min T. et al. Effects of aluminum concentration on the formation of inhibition layer during hot-dip galvanizing. *Int. J. Heat Mass Transf*. 2018;127:394–402. *https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.016*

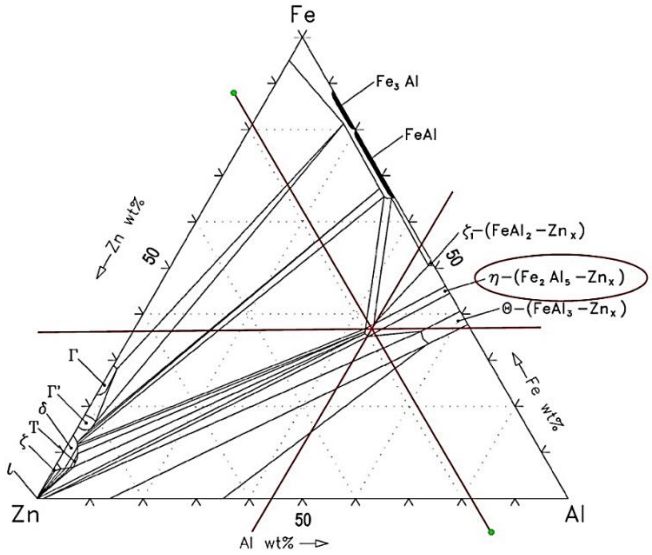


Рис. 8. Тройная диаграмма состояния Zn – Al – Fe (изотермический разрез при температуре 450 °С [16; 17])
Fig. 8. Ternary phase diagram of Zn – Al – Fe system (isothermal section at 450 °C [16; 17])

6. Khaliq A. et al. Iron Intermetallic Compounds (IMCs) Formation Mechanism in the Molten Aluminium Zinc (Al-Zn) Coating Alloy: 2. *Teh. Vjesn.-Tech. Gaz.* 2024; 31(2). *https://doi.org/10.17559/TV-20230523000660*

7. Khezrloo A. et al. Effect of coating parameters on microstructure, corrosion behavior, hardness and formability of hot-dip Galfan and galvanized coatings. *Int. J. Mater. Res*. 2021;112(4):321–332. *https://doi.org/10.1515/ijmr-2020-7991*

8. Mendala J. Influence of the cooling method on the structure of 55AlZn coatings. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng*. 2011;22:012004. *https://doi.org/10.1088/1757-899X/22/1/012004*

9. Fornalczyk A., Cebulski J., Dorota P. The Morphology of Corrosion Products in FeAl Alloys after Heat-Resistance Tests at Different Temperatures. *Solid State Phenom*. 2015;227:409–412. *https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.227.409*

10. Kania H., Komorowski L. The Influence of the Chemical Composition of a Zinc Bath upon Corrosion Resistance of Coatings Obtained on Sebisty Steel. *Solid State Phenom*. 2016;246:85–90. *https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.246.85*

11. Zhang X., Leygraf C., Odnevall Wallinder I. Atmospheric corrosion of Galfan coatings on steel in chloride-rich environments. *Corros. Sci*. 2013;73:62–71. *https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.03.025*

12. Zhu X. et al. Effect of Hot Dip Plating Process Parameters on Microstructure and Properties of Zinc – 10 % Aluminum – Mischmetal Alloy Coated for Bridge Cable Steel Wire. *Metals.* 2022;12(8):1257. *https://doi.org/10.3390/met12081257*

13. Mesbahzadeh A. et al. Interfacial Investigation of St13/Molten Zn – 5 % Al and Corrosion Behavior of Formed Layer via Hot-Dip Process. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2021;57(1):124–135. *https://doi.org/10.3103/S1068375521010087*

14. Han S.-C. et al. Role of silicon on formation and growth of intermetallic phases during rapid Fe – Zn alloying reaction. *Mater. Today Adv*. 2023;18:100368. *https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2023.100368*

15. Lee I. et al. Experimental determination of phase diagram at 450 °C in the Zn–Fe–Al ternary system. *J. Alloys Compd*. 2021;854:157163.

16. Ghosh G., Palm M. Al-Fe-Zn Ternary Phase Diagram Evaluation. *MSI Eureka*. 2023;96:10.17658.4.5. *https://doi.org/10.7121/msi-eureka-10.17658.4.5*

17. Tang N.-Y., Su X. On the ternary phase in the zinc-rich corner of the Zn–Fe–Al system at temperatures below 450 °C. *Metall. Mater. Trans. A.* 2002;33(50): 1559–1561. *https://doi.org/10.1007/s11661-002-0078-5*

Сведения об авторах

Ольга Сергеевна Бондарева*, к.т.н., доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения*, Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева
E-mail*:* osbond@yandex.ru
ORCID*:* 0000-0002-4273-2483

Information about the authors:

Olga S. Bondareva*, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science,* Samara National Research University
E-mail*:* osbond@yandex.ru
ORCID*:* 0000-0002-4273-2483

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 28.01.2025
После доработки 17.02.2025
Принята к публикации 20.02.2025

Received 28.01.2025
Revised 17.02.2025
Accepted 20.02.2025