



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 669.58

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.031



ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ЦИНКОВАНИЕ КРЕПЕЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Ольга Сергеевна Бондарева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия
osbondareva@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4273-2483>

Аннотация. Высокотемпературное цинкование подразумевает собой погружение стальных изделий в расплав цинка при температуре выше 500°C. Есть данные об особенностях фазового строения цинкового покрытия, полученного при таких температурах, обеспечивающих более низкую толщину покрытия. Крепежные изделия с резьбой требуют минимальной толщины покрытия для обеспечения удовлетворительной свинчиваемости изделий. Однако необходимо также обеспечить высокий уровень эксплуатационных свойств покрытия на крепеже, таких как твердость стальной основы, твердость покрытия, коэффициент трения, коррозионная стойкость. В связи с этим целью работы было исследование структуры и свойств цинковых покрытий, образующихся в расплаве при температуре 450–560°C, на крепежных изделиях с резьбой. Установлено, что воздействие высокой температуры расплава приводит к снижению твердости стали болтов, однако твердость остается в пределах нормы. Показано, что минимальная толщина покрытия на всех исследуемых сталях образуется в интервале температур цинкования 530–560°C. Совместный анализ данных рентгенофазового анализа и энергодисперсионного микроанализа показал, что покрытие, образующееся в расплаве при температуре 530°C, практически не содержит ζ -фазу, которая отвечает за интенсивный рост покрытия. Свойства цинковых покрытий, образующихся в расплаве в высокотемпературном диапазоне, отвечают эксплуатационным требованиям для крепежа. Покрытия имеют в 1,5–2 раза большую твердость, большую шероховатость поверхности, меньший коэффициент трения по сравнению со стандартным цинковым покрытием, образующимся в расплаве при 450°C. Покрытие, образующееся в расплаве при 530°C, в гальванической паре более коррозионностойкое по сравнению со стандартным цинковым покрытием.

Ключевые слова: горячее цинкование, высокотемпературное цинкование, цинковое покрытие, температура цинкования, цинкование крепежа, структура покрытия, толщина покрытия.

Благодарности: автор выражает признательность коллегам за помощь.

Для цитирования: Бондарева О.С. Высокотемпературное цинкование крепежных изделий // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 199–206. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.031. EDN: <https://elibrary.ru/JKHFNN>.

Original article

HIGH TEMPERATURE HOT-DIP GALVANIZING OF FASTENERS

Olga S. Bondareva

¹ Samara National Research University, Samara, Russia

¹ osbondareva@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4273-2483>

Abstract. High-temperature hot-dip galvanizing involves immersing steel products in molten zinc at temperatures above 500°C. There is data on the peculiarities of the phase structure of zinc coating obtained at such temperatures that provide a lower coating thickness. Threaded fasteners require a minimum coating thickness to ensure satisfactory product make-up. However, it is also necessary to ensure a high level of performance properties of the coating on the fastener, such as the hardness of the steel base, coating hardness, coefficient of friction, and corrosion resistance. In this regard, the goal of the work was to study the structure and properties of zinc coatings formed in the melt at a temperature of 450–560°C on threaded fasteners. It has been established that exposure to high melt temperatures leads to a decrease in the hardness of steel bolts, but the hardness remains within normal limits. It has been shown that the minimum coating thickness on all steels under study is formed in the galvanizing temperature range of 530–560°C. A joint analysis of X-ray phase analysis and energy-dispersive microanalysis data showed that the coating formed in the melt at a temperature of 530°C practically does not contain the ζ -phase, which is responsible for the intensive growth of the coating. The properties of zinc coatings formed in the melt in the high temperature range meet the operational requirements for fasteners. The coatings have 1.5–2 times greater hardness, greater surface roughness, and a lower coefficient of friction compared to standard zinc coatings formed in the melt at 450°C. The coating formed in the melt at 530°C is more chemically resistant compared to standard zinc coating.

Keywords: hot-dip galvanizing, high temperature hot-dip galvanizing, zinc coating, temperature galvanizing, galvanizing of fasteners, structural coatings, coating coatings.

Acknowledgements: the author expresses gratitude to her colleagues for their help.

© Бондарева О. С., 2025

For citation: Bondareva, O. S. (2025). High temperature hot-dip galvanizing of fasteners. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 199-206. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.031. EDN: <https://elibrary.ru/JKHFNN>.

ВВЕДЕНИЕ

Горячее цинкование является одним из основных способов нанесения цинкового покрытия на крепеж и распространено шире, чем термодиффузионное цинкование и гальваническое цинкование из-за таких преимуществ как высокая прочность сцепления с основой и превосходная коррозионная стойкость [1, 2]. При обычных температурах горячего цинкования (450°C) толщина цинкового покрытия зависит от химического состава стали [3], особенно от содержания кремния [4]. Кремний является раскислителем и популярным легирующим элементом в сталях, применяемых для изготовления крепежа, таких как Ст3, 20, 40Х, 30ХГСА, 09Г2С и др. Известно, что на сталях, содержащих кремний до 0,08 вес.%, образуются покрытия, состоящие из тонких, плохо различимых слоев Γ ($\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$, FeZn_3 , Fe_4Zn_9) и Γ_1 ($\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}/\text{FeZn}_4/\text{Fe}_{11}\text{Zn}_{40}$), а также слоев δ_{1p}/δ_{1k} ($\text{FeZn}_{10}/\text{Fe}_{13}\text{Zn}_{126}/\text{FeZn}_7$), ζ (FeZn_{13}) и η (Zn) - фаз примерно одинаковой толщины [5]. При содержании кремния 0,08-0,12 вес.% наблюдаются локальные утолщения ζ -фазы, приводящие к значительной разнотолщинности покрытия, получившей название «эффект Санделина» [6]. На сталях, содержащих кремний 0,15-0,35 вес.%, цинковое покрытие имеет минимальную толщину и состоит в основном из слоев δ и ζ -фаз. Дальнейшее увеличение содержания кремния в стали более 0,4 вес.% приводит к интенсивному росту покрытия за счет роста ζ -фазы, что является недостатком, т.к. приводит к перерасходу цинка и риску отслоения покрытия [7]. Sánchez показал, что ζ -фаза формируется первая при образовании покрытия и ее рост и строение особо чувствительны к содержанию кремния в стали [8]. В двойной системе Fe-Zn показано, что ζ -фаза образуется по перитектической реакции при температуре около 530°C, следовательно при более высоких температурах фазовый состав покрытия не должен содержать ζ -фазу [9]. Поэтому повышение температуры процесса цинкования выше 530°C может быть возможным решением этой проблемы цинкования кремнийсодержащих сталей, которое позволит лучше контролировать толщину и состав покрытия. Такой процесс рассматривался ранее и получил название высокотемпературное цинкование (high temperature hot-dip galvanizing (HT-HDG)), однако опубликованные исследования недостаточны полные. Chidambaram и др. (1991г) показал, что на пластинах из бескремнистых и раскисленных кремнием сталей при температуре расплава 560°C образуются покрытия, микроструктура которых представлена δ - $\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$ и ζ - FeZn_{13} фазами [10]. Verma изучал покрытия, полученные при температуре расплава 560°C на плоских образцах, углах и трубах из сталей, раскисленных кремнием. Он отмечал, что толщина и распределение фаз в покрытиях не значительно зависели от времени погружения от 3 до 15 минут. Покрытие состояло в основном из δ -фазы с меньшим количеством ζ -фазы и Γ -фазы. Были получены данные по повышенной коррозионной стойкости, а также более высокой твердости этих покрытий по сравнению с традиционными [11]. В продолжении своей работы Verma показал, что в покрытии на пластинах из бескремнистой стали толщина покрытия изменялась от примерно 80 мкм при 520°C до примерно 20 мкм при 555°C за счет уменьшения количества ζ фазы [12]. Wang изучал влияние темпе-

ратуры цинковой ванны в диапазоне 450–530°C на морфологию и толщину покрытий на модельном сплаве Fe–0,1 вес.% Si. Было установлено, что толщина покрытия достигает максимума при температуре расплава 470°C и минимума при температуре расплава 500°C соответственно. Показано, что при температуре 500°C ζ -фаза исчезает, и покрытие состоит из δ -фазы [13]. Vísao также рассматривал влияние температуры цинковой ванны в диапазоне 450–530°C на морфологию и толщину покрытия на чистом железе. Установлено, что при температуре цинкования от 450 до 470°C покрытие состоит из плотного ζ -(FeZn_{13})-слоя поверх δ -($\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$)-слоя. Толщина покрытия максимальна при 480°C. Структура такого покрытия представлена в основном ζ -фазой, соседствующей с областями чистого цинка. Покрытие, образующееся при температуре расплава 500°C, состоит в основном из δ -фазы [14]. Высокотемпературное цинкование (535-565°C) высококремнистых сталей типа 09Г2С исследовалось в моей более ранней работе [15]. Было установлено, что толщина покрытия уменьшается и достигает минимума при температуре расплава 555°C. Структура данного покрытия не содержит ζ -фазу в чистом виде [15]. Таким образом, все исследователи отмечают, что высокотемпературное цинкование позволяет получать тонкие покрытия, как на реактивных, так и на высококремнистых сталях. Также важно отметить ряд ограничений данной технологии. Во-первых, при таких температурах приходится использовать дорогую керамическую футеровку ванн цинкования. Во-вторых, установлено, что высокотемпературные покрытия более хрупкие при испытании на трехточечный изгиб, чем традиционные покрытия, однако более твердые и износостойкие [16]. Исходя из сказанного, перспективным направлением представляется использование высокотемпературного цинкования для получения цинковых покрытий на крепеже. Основной проблемой при горячем цинковании изделий с резьбой является образование наплывов, неравномерное или слишком толстое покрытие, не обеспечивающее удовлетворительную свинчиваемость деталей. Цинкование крепежа обычно проводится на малых линиях с керамическими ваннами, что делает возможным использование высокотемпературного диапазона. Повышенная твердость и износостойкость высокотемпературного цинкового покрытия могут стать преимуществом для крепежа. Следует отметить, что воздействие высокой температуры при горячем цинковании снижает предел текучести, предел прочности и твердость высокопрочных сталей [17, 18]. Поэтому высокотемпературное цинкование стоит рассматривать только применительно для крепежа класса прочности 5.8. На сегодняшний день недостаточно данных о возможности применения высокотемпературного горячего цинкования для изделий с резьбой.

Целью данной работы было исследование структуры и свойств цинковых покрытий, образующихся в расплаве при температуре 450-560°C, на крепежных изделиях с резьбой.

МЕТОДЫ

Образцы для исследования представляли собой болты из наиболее распространенных марок сталей, класс прочности 5.8. Особое значение имеет

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2025

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ЦИНКОВАНИЕ КРЕПЕЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ

содержание кремния в сталях, стали Ст3 и 20 содержит кремний в следствие раскисления, сталь 09Г2С в качестве упрочняющего легирующего элемента. Поэтому химический состав сталей уточняли с помощью оптико-эмиссионного анализатора Foundry-Master XPR. Результаты представлены в таблице 1. Измерение твердости стальной основы до и после цинкования проводили на твердомере Роквелла по шкале HRB и переводили в единицы по шкале HB. Для обеспечения смачивания поверхности стали горячим цинковым расплавом образцы прошли стандартные операции химической подготовки поверхности. Они включали в себя последовательное погружение в ванны обезжиривания (20%NaOH), промывки в воде, травления (10% HCl), промывки в воде, флюсования в растворе солей $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{ZnCl}_2$. После этого образцы сушили при 100°C и погружали в расплав цинка с добавкой 0,1% алюминия. Температурный диапазон горячего цинкования составил 450-550°C с шагом 10°C. Время выдержки образцов в расплаве - 80 сек. После извлечения образцы

центрифугировали и охлаждали в воде. Микроструктура покрытия изучалась на поперечных шлифах. Структуру выявляли травлением в 4% растворе HNO_3 в спирте. При помощи сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA SB измеряли толщину покрытия, исследовали его структуру и морфологию фазовых слоев. Рентгенофазовый анализ проводили с помощью рентгеновского дифрактометра «Дрон-7» в монохроматизированном $\text{FeK}\alpha$ излучении. Энергодисперсионный рентгеноспектральный микроанализ структурных составляющих покрытия проводили с помощью детектора INCAx-act. Шероховатость поверхности покрытия измеряли на приборе SURTRONIC 25. Микротвердость покрытия определялась по микро-Виккерсу с помощью Микротвердомера PMT-3 с нагрузкой 20 г. Коэффициент трения покрытий анализировали в геометрии палец-диск с помощью трибометра CSM Instruments при комнатной температуре. Стандартный электродный потенциал измеряли с помощью электропотенциометра.

Таблица 1 - Химический состав стали болтов, вес.% / Table 1 – Chemical composition of steel, wt.%

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Fe
Ст3кп	0,172	0,01	0,321	0,081	0,0550	0,0037	0,0130	основа
Ст3пс	0,175	0,08	0,404	0,033	0,0270	0,0060	0,0021	основа
20	0,23	0,37	1,26	0,282	0,0279	0,0030	0,0021	основа
09Г2С	0,122	0,72	1,51	0,031	0,0562	0,0091	0,0090	основа

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали, что воздействие высокой температуры расплава приводит к снижению твердости стали болтов, однако твердость остается в пределах нормы 152-238 HB для класса прочности 5.8 по ГОСТ 1759.4-87 (рис.1).

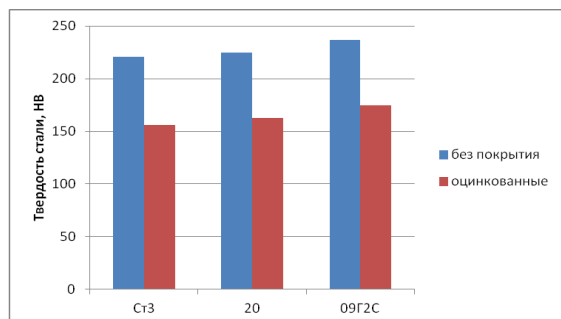


Рисунок 1 – Изменение твердости стали болтов в результате горячего цинкования, HB

Figure 1 – Change in the hardness of the steel of bolts as a result of hot-dip galvanizing, HB

Влияние температуры цинкования на толщину покрытия показано на рисунке 2.

Анализ полученных зависимостей показал, что для каждой стали в исследуемом диапазоне наблюдается максимум толщины покрытия. Для бескремнистой стали Ст3кп толщина покрытия возрастает незначительно с 40 до 60 мкм при температуре цинкования 500°C и затем стабилизируется и составляет 50 мкм при температуре цинкования 510-540°C. Для реактивной «санделиновой» стали Ст3сп (Si=0,08 вес.%) наибольшая толщина покрытия образуется при температуре расплава 470°C, при температуре расплава 510-540°C толщина образующегося покрытия минимальна и составляет около 70 мкм. Толщина покрытия на стали 20 (Si=0,37 вес.%) плавно увеличивается до 100 мкм при температуре расплава 470-510°C и затем уменьшается до минимального значе-

ния в 60-70 мкм при температуре расплава 530-550°C. Толщина покрытия на стали 09Г2С (Si=0,72 вес.%) интенсивно возрастает с увеличением температуры цинкования и достигает максимума в 240 мкм в интервале 470-520°C, затем резко снижается и при температуре цинкования 540°C составляет 100 мкм, а при температуре 560°C – 60 мкм. Таким образом, в высокотемпературном диапазоне толщина цинкового покрытия имеет минимальные значения в интервале температур цинкования 530-560°C для всех исследуемых марок сталей.

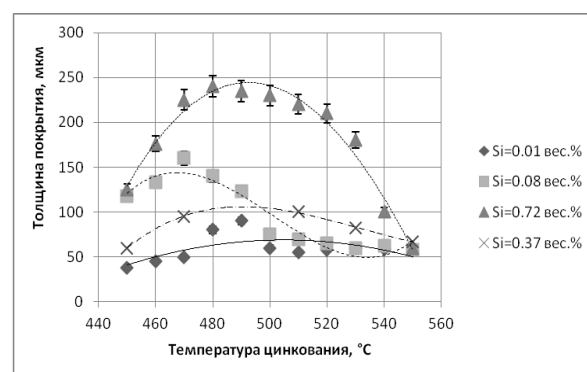


Рисунок 2 – Зависимость толщины покрытия от температуры цинкования

Figure 2 – Dependence of coating thickness on galvanizing temperature

Фотографии микроструктуры покрытий, образующихся на разных сталях при температуре расплава 450°C, показаны на рисунке 3. Исследования показали, что на бескремнистой стали Ст3кп (Si=0,01 вес.%) покрытие состоит из трех фазовых слоев δ , ζ и η равномерной толщины (рис.3а). В покрытии на реактивной стали Ст3сп (Si=0,08 вес.%) ζ -фаза имеет разветвленную структуру неодинаковой толщины, в некоторых местах кристаллиты ζ -фазы выходят на поверхность покрытия (рис. 3б). Покрытие на стали 20

(Si=0,37 вес.%) на половину состоит из ζ -фазы, которая меняет свою структуру на крупнокристаллическую (рис.3в). На стали с высоким содержанием кремния 09Г2С (Si=0,72 вес.%) покрытие почти полностью представлено крупными кристаллами ζ -фазы, поверхностная η -фаза отсутствует (рис.3г).

Микроструктура покрытия, полученного в высокотемпературном диапазоне, на всех сталях имеет схожее строение. Для наглядного сравнения показана поверхность и поперечное сечение покрытия, полученного при температуре цинкования 480°C, 530°C и 560°C, на резьбе болтов из стали 20 (рис.4).

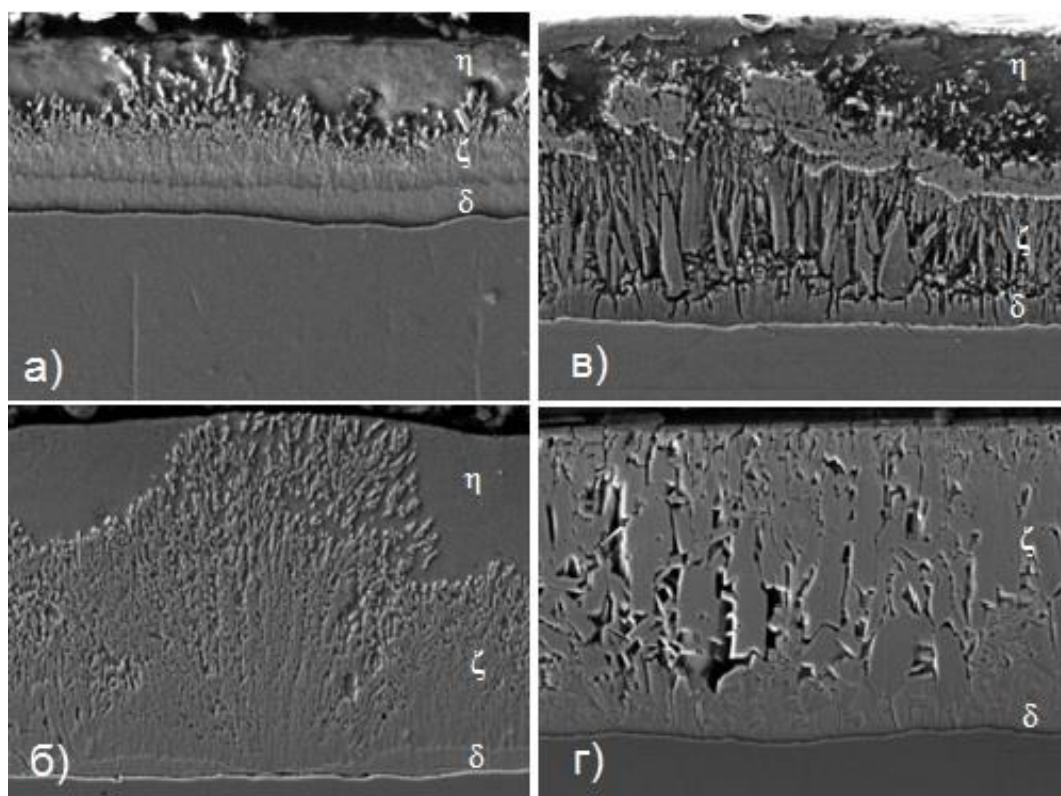


Рисунок 3- Микроструктура покрытий, образующихся при T=450°C, t=80 сек, x1000:

а) Ст3кп (Si=0,01 вес.%); б) Ст3 пс (Si=0,08 вес.%);
в) сталь 20 (Si=0,37 вес.%); г) 09Г2С (Si=0,72 вес.%)

Figure 3 - Microstructure of coatings formed at T=450°C, t=80 sec, x1000:

а) St3kp (Si=0.01 wt%); б) St3 ps (Si=0.08 wt%);
с) steel 20 (Si=0.37 wt%); д) 09G2S (Si=0.72 wt.%)

Анализ микроструктуры покрытия показал, что с повышением температуры меняется фазовое строение покрытия. Наплывы чистого цинка во впадинах резьбы отсутствуют на всех образцах. Для идентификации фаз был проведен рентгенофазовый анализ поверхности покрытия и энергодисперсионный рентгеноспектральный микроанализ фазовых слоев в

поперечном сечении покрытия. Полученные результаты микроанализа позволяют уточнить результаты рентгенофазового анализа с помощью сравнения с известными областями гомогенности интерметаллидных Fe-Zn фаз, образующихся на чистом железе в равновесных условиях.

Таблица 2 – Области гомогенности некоторых фазовых составляющих в Fe-Zn сплавах [5]

Table 2 – Areas of homogeneity of some phase components in Fe-Zn alloys [5]

Фаза	Соединение	Fe (вес.%)
η	Zn	0,03
ζ	FeZn_{13}	6,17
δ_{1p}	FeZn_{10} / $\text{Fe}_{13}\text{Zn}_{126}$	7,87/8,09
δ_{1k}	FeZn_7	10,87
Γ_1	$\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$	16,9
	FeZn_4	17,6
	$\text{Fe}_{11}\text{Zn}_{40}$	19,02
Γ	$\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$	20,4
	FeZn_3	22,16
	Fe_4Zn_9	27,52

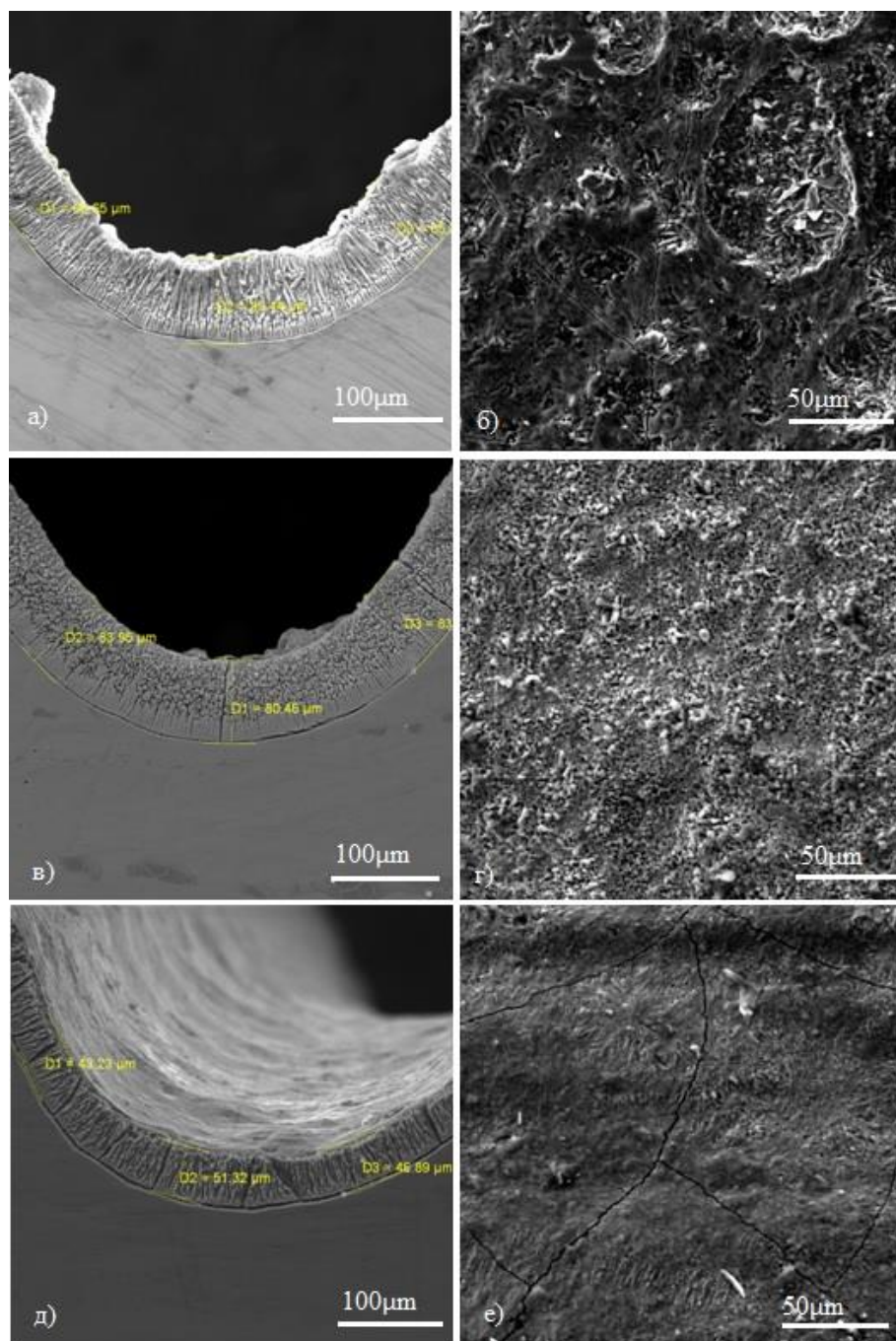


Рисунок 4 – Цинковое покрытие, полученное на стали 20, время выдержки в расплаве 80 сек:

- а) микроструктура покрытия на резьбе, $T=480^{\circ}\text{C}$; б) поверхность, $T=480^{\circ}\text{C}$;
 в) микроструктура покрытия на резьбе, $T=530^{\circ}\text{C}$; г) поверхность, $T=530^{\circ}\text{C}$;
 д) микроструктура покрытия на резьбе, $T=560^{\circ}\text{C}$; е) поверхность, $T=560^{\circ}\text{C}$.

Figure 4 - Zinc coating obtained on steel 20, holding time in the melt for 80 seconds:

- a) microstructure of the coating on the thread, $T=480^{\circ}\text{C}$; b) surface, $T=480^{\circ}\text{C}$;
 c) microstructure of the coating on the thread, $T=530^{\circ}\text{C}$; d) surface, $T=530^{\circ}\text{C}$;
 e) microstructure of the coating on the thread, $T=560^{\circ}\text{C}$; f) surface, $T=560^{\circ}\text{C}$.

Результаты рентгенофазового анализа приведены на рисунке 5. Результаты энергодисперсионного

рентгеноспектрального микроанализа приведены в таблице 3 и 4.

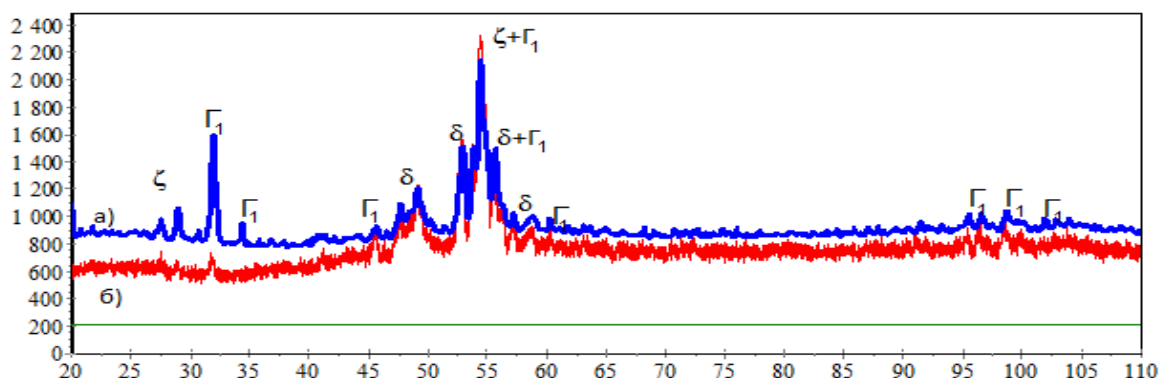


Рисунок 5 – Дифрактограммы с поверхности покрытия:
а) температура цинкования 560°C; б) температура цинкования 480°C

Figure 5 – Diffraction patterns from the coating surface:
а) galvanizing temperature 560°C; б) galvanizing temperature 480°C

Рентгенофазовый анализ показал, что при температуре 560°C в покрытии увеличивается содержание Γ_1 -фазы, практически исчезает ζ -фаза. Энерго-

дисперсионный рентгеноспектральный микроанализ позволяет идентифицировать наличие железоцинковых фаз в слоях по сечению покрытия.

Таблица 3 – Энергодисперсионный рентгеноспектральный микроанализ фазовых слоев в поперечном сечении покрытия, полученного в расплаве при температуре цинкования 480°C

Table 3 – Energy-dispersive X-ray spectral microanalysis of phase layers in the cross section of the coating obtained in the melt at a galvanizing temperature of 480°C

Точка анализа	Al	Fe	Zn	Итого	Фаза
1	0.94	13.74	85.32	100.00	Γ_1 -фаза
2	0.95	9.89	89.16	100.00	δ -фаза
3	0.91	9.80	89.29	100.00	δ -фаза

Таблица 4 – Энергодисперсионный рентгеноспектральный микроанализ фазовых слоев в поперечном сечении покрытия, полученного в расплаве при температуре цинкования 530°C

Table 4 – Energy-dispersive X-ray spectral microanalysis of phase layers in the cross section of the coating obtained in the melt at a galvanizing temperature of 530°C

Точка анализа	Al	Fe	Zn	Итого	Фаза
1	0.65	15.38	83.97	100.00	Γ_1 -фаза
2	0.52	12.35	87.13	100.00	$\delta+\Gamma_1$ -фаза
3	0.87	11.69	87.44	100.00	$\delta+\Gamma_1$ -фаза

Таким образом, совместный анализ данных рентгенофазового анализа и энергодисперсионного микроанализа показал, что с увеличением температуры расплава с 480°C до 530°C поверхностный слой покрытия состоит из смеси δ + Γ_1 -фаз. Это объясняется тем, что при температуре выше 530°C ζ -фаза не образуется.

Условия эксплуатации крепежных изделий с резь-

бой накладывают ряд требований к наносимым покрытиям. Большое значение имеют такие свойства как твердость, шероховатость поверхности, коэффициент трения и стойкость к контактной гальванической коррозии. Сравнительные характеристики данных свойств для покрытий, полученных погружением в расплав температурой 450°C и при 530°C приведены в таблице 5.

Таблица 5. Свойства цинковых покрытий, полученных при температурах 450°C и 530°C

Table 5. Properties of zinc coatings obtained at temperatures of 450°C and 530°C

Свойство	Горячее цинкование, 450°C	Горячее цинкование, 530°C
Микротвердость поверхности, HV ₂₀	30-36	45-60
Шероховатость, Ra, мкм	0,84	1,2
Коэффициент трения	0,171	0,134
Стандартный электродный потенциал, В	-0,726	-0,630

Исследования показали, что цинковые покрытия, полученные при высокотемпературном горячем цинковании, имеют в 1,5-2 раза большую твердость, что косвенно свидетельствует о более высокой прочности и износостойкости. Также высокотемпературные цинковые покрытия имеют несколько большую шероховатость поверхности, и меньший коэффициент трения по сравнению со стандартным цинковым покрытием, полученным при 450°C, что благоприятно сказывается на моменте затяжки болта. Стандартный электродный потенциал характеризует химическую активность металла при образовании гальванических пар. Более электроотрицательный металл в паре корродирует в первую очередь. Покрытие, образующееся в расплаве при 530°C, более химически устойчиво по сравнению со стандартным цинковым покрытием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что воздействие высокой температуры расплава приводит к снижению твердости стали болтов, однако твердость остается в пределах нормы 152-238 НВ по ГОСТ 1759.4-87.

Показано, что для всех исследуемых сталей при цинковании в интервале 450-560°C наблюдается возрастание толщины покрытия до максимума и затем снижение толщины. Для обеспечения минимальной толщины покрытия 50-70 мкм на сталях с различным содержанием кремния необходимо выдерживать температурный диапазон расплава 530-560°C.

Определено, что с повышением температуры меняется фазовое строение покрытия. Совместный анализ данных рентгенофазового анализа и энергодисперсионного микроанализа показал, что с увеличением температуры расплава с 480°C до 530°C поверхностный слой покрытия состоит из смеси δ + Γ_1 -фаз. Фаза ζ в покрытии не обнаруживается. Наплывы цинка во впадинах резьбы отсутствуют.

Сравнительный анализ эксплуатационных свойств показал, что цинковые покрытия, полученные в расплаве при температуре выше 530°C, имеют в 1,5-2 раза большую твердость, несколько большую шероховатость поверхности Ra 1,2 мкм, меньший коэффициент трения 0,134 по сравнению со стандартным цинковым покрытием, полученным при 450°C. Покрытие, образующееся в расплаве при 530°C, имеет стандартный электродный потенциал -0,63 В, что говорит о его большей химической устойчивости по сравнению со стандартным цинковым покрытием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chung P.P., Wang J., Durandet Y. Deposition processes and properties of coatings on steel fasteners — A review // Friction. 2019. Vol. 7, № 5. P. 389–416. doi: 10.1007/s40544-019-0304-4
2. Сравнительный анализ структуры и электрохимических свойств цинковых покрытий для прогнозирования возникновения контактной коррозии на крепеже / О. С. Бондарева, О. С. Добычина, М. О. Дмитриева, С. В. Коновалов // Черные металлы. 2023. № 10. С. 35-41. doi: 10.17580/chm.2023.10.06.
3. Effect of chemical composition of steel on the structure of hot – Dip galvanized coating / P. Pokorny, J. Kolisko, L. Balik, P. Novak // Metalurgija. 2016. Vol. 55. P. 115–118.
4. Role of silicon on formation and growth of intermetallic phases during rapid Fe–Zn alloying reaction / S.-Ch. Han, D. F. Sanchez, D. Grolmund, S. Uhm, D.-Y. Choi, H.-Ch. Jeong, T.-S. Jun // Mater. Today Adv. 2023. Vol. 18. P. 100368. doi: 10.1016/j.mtadv.2023.100368
5. Reaction kinetics of the formation of intermetallic Fe – Zn during hot - Dip galvanizing of steel / P. Pokorny, J. Kolisko, L. Balik, P. Novak // Metalurgija. 2016. Vol. 55. P. 111–114.
6. Sandelin R.W. Galvanizing characteristic of different types of steel // Wire Wire Prod. 1940. Vol. 15. P. 655–660.
7. The role of silicon in the hot dip galvanizing process / S. Sepper, P. Peetsalu, P. Kulu, M. Saarna, V. Mikli // Proc. Est. Acad. Sci. 2016. Vol. 65, № 2. P. 159. doi: 10.3176/proc.2016.2.11
8. Sánchez C. et al. Silicon Effect and Microstructural Evolution of Hot Dip Galvanized Coating of Structural Steels / Ch. Sánchez, O. Bustos, A. Artigas, H. Bruna // Metals. 2023. Vol. 13, № 11. P. 1892. doi: 10.3390/met13111892
9. Marder A.R., Goodwin F.E. Zn coating phase equilibria // The Metallurgy of Zinc Coated Steels. Elsevier, 2023. P. 35–48.
10. Chidambaram P.R., Rangarajan V., Van Ooij W.J. Characterization of high temperature hot dip galvanized coatings // Surf. Coat. Technol. 1991. Vol. 46, № 3. P. 245–253. doi: 10.1016/0257-8972(91)90167-U
11. Verma A.R.B., Van Ooij W.J. High-temperature batch hot-dip galvanizing. Part 1. General description of coatings formed at 560 °C // Surf. Coat. Technol. 1997. Vol. 89, № 1–2. P. 132–142. doi: 10.1016/S0257-8972(96)02941-6.
12. Verma A.R.B., Van Ooij W.J. High-temperature batch hot-dip galvanizing. Part 2. Comparison of coatings formed in the temperature range 520–555 °C // Surf. Coat. Technol. 1997. Vol. 89, № 1–2. P. 143–150. doi: 10.1016/S0257-8972(96)02940-4
13. The effects of zinc bath temperature on the coating growth behavior of reactive steel / J. Wang, H. Tu, B. Peng, X. Wang, F. Yin, X. Su // Mater. Charact. 2009. Vol. 60,

№ 11. P. 1276–1279. doi: 10.1016/j.matchar.2009.05.010

14. Effects of zinc bath temperature on the coatings of hot-dip galvanizing / P. Bica, W. Jianhua, S. Xuping, L. Zhi, Y. Fucheng // Surf. Coat. Technol. 2008. Vol. 202, № 9. P. 1785–1788. doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.07.044

15. Бондарева О., Мельников А. Влияние температуры цинкового расплава на толщину и структуру покрытия при высокотемпературном горячем цинковании сталей с высоким содержанием кремния // Известия Вузов Порошковая Металлургия И Функциональные Покрытия. 2015. № 1. P. 66–70. doi: 10.17073/1997-308X-2015-1-66-70

16. Tzimas E., Papadimitriou G. Cracking mechanisms in high temperature hot-dip galvanized coatings // Surf. Coat. Technol. 2001. Vol. 145, № 1–3. P. 176–185. doi: 10.1016/S0257-8972(01)01323-8

17. The Influence of Hot-Dip Galvanizing on the Mechanical Properties of High-Strength Steels / M. Šmak, J. Kubíček, J. Kala, K. Podaný, J. Vanerek // Materials. 2021. Vol. 14, № 18. P. 5219. doi: 10.3390/ma14185219

18. Prediction of Mechanical Properties for High Strength Low Alloyed Steels in a Commercial Hot Dip Galva-

nizing Line without Soaking Section / Á. García-Martino, C. García, M. Prieto and J. Díaz // Metals. 2020. Vol. 10, № 5. P. 561. doi: 10.3390/met10050561

Информация об авторах

О. С. Бондарева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии металлов и авиационного материаловедения» Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

Information about the authors

O.S. Bondareva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Metal Technologies and Aviation Materials Science», Samara National Research University named after Academician S.P Koroleva.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 12 июля 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 12 July 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.