

**Оригинальная статья**

УДК 669.58:621.45.038.72

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-4(46)-79-87

**ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ФЛЮСА  $ZnCl_2-NH_4Cl$  НА ФОРМИРОВАНИЕ  
ЦИНКОВОГО ПОКРЫТИЯ**

© 2023 г. О. С. Бондарева<sup>1</sup>, О. С. Добычина<sup>1,2</sup>, В. Г. Пономарев<sup>3</sup>, Е. Е. Вдовина<sup>1</sup>,  
Д. И. Лазунина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

<sup>2</sup>ОАО «Завод Промаш» (Россия, 443022, Самара, Заводское шоссе, 11)

<sup>3</sup>ООО «Промхимперм» (Россия, 614109, Пермь, ул. А. Ушакова, 36Б)

**Аннотация.** Основным этапом подготовки поверхности для горячего цинкования является операция флюсования. Погружение изделий во флюс обеспечивает очистку от пленок оксидов и активирует поверхность, обеспечивая связь между основным металлом и цинковым покрытием. Целью настоящей работы является сравнение пяти модификаций наиболее популярного флюсового состава на основе  $ZnCl_2$  и  $NH_4Cl$  производства ООО «Промхимперм» с импортным образцом производства Испания, а также выявление влияния модифицирующих компонентов составов на качество оцинковки изделий. Образцы погружали в раствор флюса, подогретого до 50 °С, выдерживали в растворе в течение 15 минут, затем сушили. Исследование структуры и элементного анализа образцов флюсов, высушенных на стальной поверхности, изучали на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA SB, равномерность распределения элементов оценивали картированием, проведенным методом энергодисперсионного микроанализа с помощью приставки INCA-act. Для определения смачивающей способности флюсов были проведены измерения краевого угла смачивания по методу «лежащей капли». Смачивание и растекание цинкового расплава по офлюсованной стали оценивали по чистоте отверстий (процинковке) на образцах. Установлено, что все представленные флюсы обладают хорошими смачивающими свойствами. У большинства флюсов выражен «морозный» рисунок кристаллизации хлорида цинка. Все модифицирующие компоненты флюсов (за исключением марганца) распределяются по поверхности равномерно. Визуальная оценка качества цинкового покрытия, формирующегося после флюсования различными составами, показала, что наилучшая процинковка отверстий диаметром 10 мм обеспечивается после флюсов с соотношением основных компонентов: 21 %  $ZnCl_2$  – 20 %  $NH_4Cl$ . Флюс с более полной сорбцией примесей позволил получить чистое подвесное отверстие диаметром 4 мм.

**Ключевые слова:** горячее цинкование, флюсование, флюс, смачивание, растекание, краевой угол, цинковое покрытие, картирование

**Для цитирования:** Бондарева О.С., Добычина О.С., Пономарев В.Г., Вдовина Е.Е., Лазунина Д.И. Влияние модифицирования флюса  $ZnCl_2-NH_4Cl$  на формирование цинкового покрытия. Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023;(4(46)):79–87. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4\(46\)-79-87](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4(46)-79-87)

**Original article**

**INFLUENCE OF FLUX MODIFICATION BASED ON  $ZnCl_2-NH_4Cl$  ON THE  
FORMATION OF ZINC COATING ON STEEL**

© 2023 O. S. Bondareva<sup>1</sup>, O. S. Dobychina<sup>1,2</sup>, V. G. Ponomarev<sup>3</sup>, E. E. Vdovina<sup>1</sup>,  
D. I. Lazunina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University (34 Moskovskoe route, Samara, 443086, Russian Federation)

<sup>2</sup>JSC «Plant Prodmash» (11 Zavodskoe route, Samara, 443022, Russian Federation)

<sup>3</sup>«Promkhimperm LLC» (36B A. Ushakov str., Perm, 614109, Russian Federation)

**Abstract.** The main stage of surface preparation for hot-dip galvanizing is the fluxing operation. Immersing products in flux removes oxide films and activates the surface, providing a bond between the base metal and the zinc coating.

The purpose of this work is to compare five modifications of the most popular flux composition based on  $\text{ZnCl}_2$  and  $\text{NH}_4\text{Cl}$  produced by Promkhimperm with an imported sample produced in Spain, as well as to identify the influence of the modifying components of the compositions on the quality of galvanized products. The samples were immersed in a flux solution heated to 50 °C, kept in the solution for 15 minutes, and then dried. The study of the structure and elemental analysis of flux samples dried on a steel surface was studied on a TESCAN VEGA SB scanning electron microscope, with the uniformity of element distribution assessed by mapping carried out by energy-dispersive microanalysis using the INCA-act attachment. To determine the wetting ability of fluxes, contact angle measurements were carried out using the “seated drop” method. The wetting and spreading of zinc melt over fluxed steel was assessed by the cleanliness of the holes (zinc plating) on the samples. It has been established that all presented fluxes have good surface wetting properties. Most fluxes have a frosty crystallization pattern of zinc chloride. All modifying components of fluxes, with the exception of manganese, are distributed evenly over the surface. A visual assessment of the quality of the zinc coating formed after fluxing with various compositions showed that the best galvanization of holes with a diameter of 10 mm is provided after fluxes with the ratio of the main components: 21 %  $\text{ZnCl}_2$  – 20 %  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . A flux with more complete sorption of impurities made it possible to obtain a clean hanging hole with a diameter of 4 mm.

**Key words:** hot-dip galvanizing, fluxing, flux, wetting, spreading, contact angle, zinc coating, mapping

**For citation:** Bondareva O.S., Dobychina O.S., Ponomarev V.G., Vdovina E.E., Lazunina D.I. The influence of modifying the  $\text{ZnCl}_2$ – $\text{NH}_4\text{Cl}$  flux on the formation of zinc coating. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;(4(46)):79–87. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4\(46\)-79-87](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4(46)-79-87)

## Введение

При подготовке стальных изделий к горячему цинкованию важным этапом является операция флюсования. После обезжиривания и травления поверхность становится идеально чистой и готовой к взаимодействию с покрытием. Погружение изделия во флюс позволяет очистить поверхность от остатков продуктов реакций травления и защитить от окисления. Кроме того, задачей флюса является очищение от оксидов зеркала ванны и снижение поверхностного натяжения цинкового расплава для лучшего смачивания им поверхности изделия. Наибольшей популярностью в горячем цинковании пользуется флюс, представляющий собой водный сильно концентрированный раствор  $\text{ZnCl}_2$  и  $\text{NH}_4\text{Cl}$  с содержанием хлорида цинка не более 45 % [1, 2].

Для системы  $\text{ZnCl}_2$  –  $\text{NH}_4\text{Cl}$  хорошо изучена диаграмма состояния, описывающая поведение смеси обеих солей в расплаве. Установлено, что при соотношении компонентов 1:2 образуется химическое вещество с температурой плавления 250 °C, а при соотношении 1:1 наблюдается эвтектидная реакция при температуре плавления порядка 175 °C. Еще одна эвтектидная реакция наблюдается при доле хлористого аммония около 11 % [2].

В настоящее время рекомендуют флюсы с молярным соотношением  $\text{NH}_4\text{Cl}:\text{ZnCl}_2$  в пределах 1:1,75 – 1:2,5. Хлористый цинк, находящийся во флюсе, обладает высокой гигроскопичностью, и «захваченная» им вода удаляется при очень высокой температуре. При температуре сушки (примерно 140 °C) часть воды гидратации остается, образуются так называемые оксокислоты. Они легко растворяют оксиды цинка и алюминия, образующиеся на поверхности расплава. По мере дальнейшего нагрева (выше 350 °C) оксокислота разлагается и с поверх-

ностью изделия начинает взаимодействовать чистый расплав цинка. С точки зрения растворения оксидов алюминия и цинка важны как соотношение между количеством хлористого цинка и хлористого аммония, так и общая концентрация флюса [1].

Однако постоянно возникающие новые требования к качеству цинкового покрытия и разрабатываемые новые технологии требуют совершенствования рецептур флюсов горячего цинкования. В работе [3] проанализировано несколько факторов, влияющих на эффект флюсования, изложен механизм действия традиционного аммиачно-цинкового флюса. Исследован новый тип флюса со свободным аммиаком [4, 5]. Для уменьшения белого дыма, возникающего при разложении  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , предлагается заменить его на  $\text{KCl}$  [6]. Для уменьшения толщины цинкового покрытия предлагается добавлять в стандартный флюс на основе двойной соли  $\text{ZnCl}_2$  –  $2\text{NH}_4\text{Cl}$  добавку солей никеля [7, 8]. При легировании цинкового расплава алюминием (более 0,2 %) необходима разработка новых составов флюсов, содержащих помимо двойной соли  $\text{ZnCl}_2$  –  $2\text{NH}_4\text{Cl}$  добавки  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{SnCl}_2$ ,  $\text{CeCl}_3$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{BiCl}_3$ ,  $\text{KF}$ . Результаты показывают, что некоторые компоненты флюсов реагируют с оксидами цинка и алюминия на поверхности сплава, что снижает межфазную энергию и улучшает смачиваемость между расплавленным сплавом и стальной матрицей [9, 10]. При введении в расплав цинка 5 % алюминия традиционные флюсы на основе хлоридов цинка и аммония не обеспечивают удовлетворительной смачиваемости расплавом стальной подложки, поэтому для данных покрытий разрабатываются специальные флюсы [11 – 16].

При нанесении покрытий системы Zn – Al – Mg удачным оказалось изменение соотношения компонентов  $\text{NH}_4\text{Cl}$  и  $\text{ZnCl}_2$  в сторону увеличения количества  $\text{ZnCl}_2$  [17]. Для сплава Zn – 6Al – 3Mg испытан флюс более сложного состава. Результаты показали, что при составе флюса  $\text{ZnCl}_2 - \text{NH}_4\text{Cl} - \text{KCl} - \text{BiCl}_3 - \text{HCl}$  на стальной подложке может образовываться равномерная и плотная солевая пленка с защитным эффектом, которая предотвращает окисление стальной подложки и удаляет вредные продукты реакции при горячем погружении [18]. Также отмечается положительное влияние добавки хлорида олова во флюс на основе двойной соли при получении покрытий системы Zn – Al – Mg [19, 20]. Таким образом, небольшие количества функциональных добавок (модификаторов) могут оказывать существенное влияние на основные свойства флюса: обеспечение смачиваемости изделия расплавом и удовлетворительной адгезии покрытия. Кроме того, остро стоит вопрос импортозамещения флюсов европейского производства отечественными образцами.

Целью настоящей работы является исследование составов флюсов производства ООО «Промхимперм» для горячего цинкования в сравнении с импортным образцом (производство Испании) и выявление влияния модифицирующих компонентов составов на качество оцинковки изделий.

#### Методы исследования и оборудование

Для исследования использовали образцы из стали марки СтЗсп размерами  $100 \times 100 \times 3$  мм с тремя отверстиями диаметром 10 мм. Образцы подвергали химическому обезжириванию 20 %-ным раствором  $\text{NaOH}$ , промывке, травлению в 10 %-ном растворе  $\text{HCl}$  и промывке. Затем металлические пластины погружали в раствор флюса, подогретого до  $50^\circ\text{C}$ , и выдерживали в течение 15 мин.

Составы флюсов на основе  $\text{ZnCl}_2 - \text{NH}_4\text{Cl}$  (образцы 1 – 6) представлены в табл. 1.

Профлюсованные образцы сушили в течение 10 мин при температуре  $100^\circ\text{C}$ . После сушки исследовали микроструктуру флюсового покрытия на металлической поверхности на сканирующем электронном микроскопе TESCAN Vega SB. Равномерность распределения элементов оценивали картированием, проведенным методом энергодисперсионного микроанализа с помощью приставки INCA-act.

Для определения смачивающей способности флюсов были проведены измерения краевого угла смачивания по методу «лежащей капли». Подготовленную стеклянную пластину помещали на подставку и с помощью пипетки наносили раствор флюса, получившуюся каплю фотографировали. По полученному изображению измеряли высоту  $h$  и диаметр  $d$  капли, далее по формуле Юнга рассчитывали косинус краевого угла смачивания флюсового состава.

$$\cos \theta = \frac{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - h^2}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + h^2}. \quad (1)$$

После флюсования образцы подвергали горячему цинкованию в расплаве температурой  $450^\circ\text{C}$  на производстве ОАО «Завод Проммаш».

Известно, что присутствие постороннего вещества на поверхности твердого тела препятствует установлению равновесного краевого угла  $\theta$ , особенно когда адсорбированная примесь образует на поверхности твердого тела структурно ориентированную пленку. Растекание при полном смачивании осуществляется в пленку, для которой понятие краевого угла и форму-

Т а б л и ц а 1

Флюсовые составы  
Table 1. Flux compositions

| Показатель                         | Значение показателя для образца       |                              |                                      |                                                 |                                    |                                                 |
|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                                    | 1 (стандартный, производство Испания) | 2 (модифицированный никелем) | 3 (стандартный и более полная сушка) | 4 (стандартный и более полная сорбция примесей) | 5 (модифицированный сульфат-ионом) | 6 (модифицированный никелем, марганцем, калием) |
| $\text{ZnCl}_2$ , %                | 20,89                                 | 21,00                        | 231,12                               | 22,18                                           | 21,56                              | 15,01                                           |
| $\text{NH}_4\text{Cl}$ , %         | 14,77                                 | 20,00                        | 15,99                                | 20,36                                           | 20,38                              | 22,02                                           |
| Концентрация $\text{ZnCl}_2$ , г/л | 253,4                                 | 185,4                        | 276,1                                | 269,9                                           | 269,9                              | 185,4                                           |
| Общая концентрация солей, г/л      | 432,6                                 | 555,3                        | 529,6                                | 525,1                                           | 525,1                              | 555,3                                           |
| pH                                 | 5,17                                  | 5,00                         | 5,30                                 | 5,32                                            | 5,32                               | 4,99                                            |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>       | 1,213                                 | 1,235                        | 1,245                                | 1,252                                           | 1,252                              | 1,235                                           |

ла Юнга (1) не применимы [20]. Смачивание и растекание расплава по офлюсованной стали оценивали по чистоте отверстий (процинковке) на образцах.

### Обсуждение результатов

Исследования краевого угла смачивания по методу «лежащей капли» на гидрофобном стекле показали, что все представленные флюсы обладают хорошими смачивающими свойствами поверхности: угол составляет меньше  $90^\circ$  и находится в пределах от  $32$  до  $37^\circ$  (табл. 2).

Электронно-микроскопический анализ микроструктуры флюсовой пленки позволил визуально оценить рисунок кристаллизации солей на стальной поверхности, также были получены карты распределения элементов флюса и среднее значение количества элементов на поверхности образцов после флюсования и сушки. В настоящей работе приводятся не все результаты картирования, а только импортного флюса 1 и наилучшего варианта отечественного флюса 4.

Результаты картирования флюсового покрытия 1 (производство Испании) представлены на рис. 1.

Исследования показали, что сухая пленка флюса 1 имеет выраженный кристаллический рисунок, представленный хлоридом цинка. Наблюдаются области, плохо покрытые флюсом. Азот, присутствующий в хлориде аммония, распределен по поверхности равномерно.

Анализ микроструктуры сухих пленок флюсов производства ООО «Промхимперм» показал, что основные компоненты флюсов 2 – 5 образуют ветвистый «морозный» рисунок кристаллизации, а у флюса 6 такого рисунка нет, что, по всей видимости, связано с присутствием модификаторов.

Модифицирующие компоненты флюсов (такие как никель, калий, кальций) распределяются по поверхности равномерно, марганец распределяется неравномерно, пятнами, а сульфат-ион – в виде ветвей.

Наиболее равномерное покрытие наблюдается у пленки флюса 4 с более полной сорбцией примесей и содержанием  $22,18\%$   $\text{ZnCl}_2$  и  $20,36\%$   $\text{NH}_4\text{Cl}$  (рис. 2).

Флюсовая пленка образца 4 имеет дендритную морфологию с малым количеством непокрытых областей, что отличает его от флюсов 1 – 3 и 5.

Т а б л и ц а 2

Углы смачивания поверхности флюсовыми составами  
Table 2. Angles of wetting the surface with flux compositions

| Флюс                                      | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |
|-------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| Краевой угол смачивания, $\theta$ , град. | 32 | 33 | 35 | 37 | 37 | 33 |

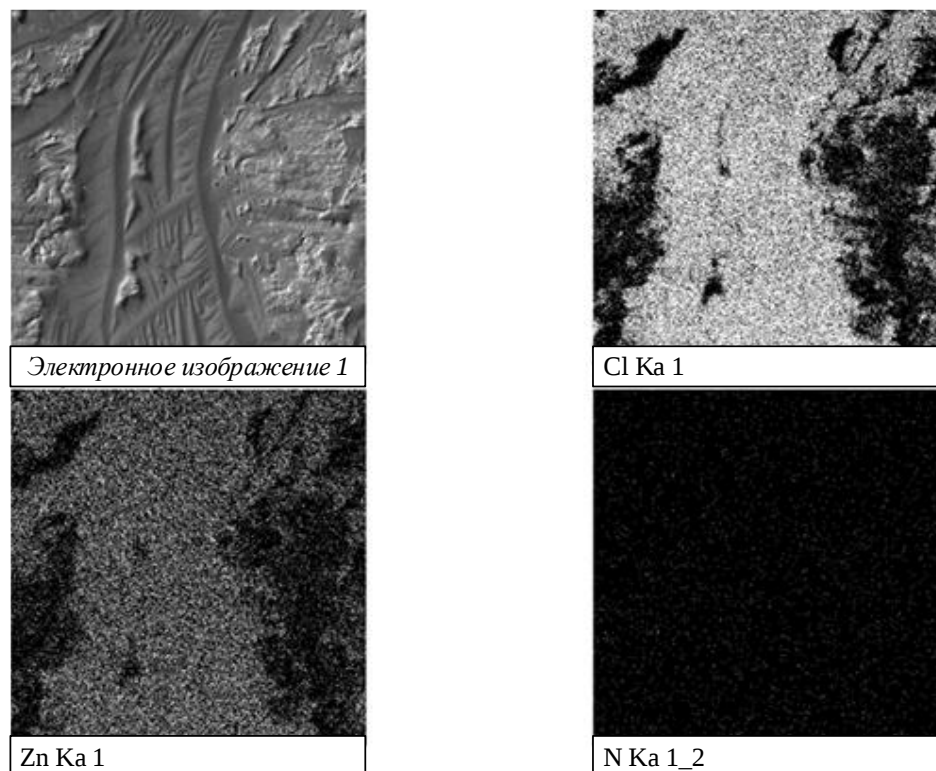


Рис. 1. Карты распределения компонентов флюса 1 на поверхности стали  
Fig. 1. Distribution maps of flux components 1 on the steel surface

Среднее содержание компонентов флюсов на поверхности стали после сушки приведено в табл. 3.

Сравнительный анализ среднего содержания компонентов флюсов на поверхности показал, что значительно различается содержание железа, которое определяется в результате проникновения электронного луча под флюсовую пленку в стальную основу. Чем более тонкая пленка, тем больше влияние основы на конечный результат анализа. Исходя из этого можно предположить, что флюсовые пленки образцов 1, 2 и 5 более тонкие, чем остальные.

Исследования распределения элементов флюсов по поверхности показали, что у большинства флюсов выражен «морозный» рисунок кристаллизации хлорида цинка, за исключением флюса 6. Предположительно это вызвано модификацией марганца и калия. Наиболее равномерное распределение хлорида цинка наблюдается при использовании флюса 4. Все модифицирующие компоненты флюсов, за исключением марганца и сульфат-иона, распределяются по поверхности равномерно.

Офлюсованные образцы подвергали горячему цинкованию. Растекание расплава по офлюсованной стали оценивали по чистоте отверстий (процинковке) на образцах. Установлено, что образец с флюсовой пленкой 4 был процинкован полностью, включая отверстия диаметром 10 мм, кроме того, чисто оцинковано и навесное отверстие диамет-

ром 4 мм. Образцы с флюсовыми пленками 2 и 5 также обеспечили чистую оцинковку отверстий диаметром 10 мм, но навесное отверстие было затянато цинковой пленкой. Образцы с флюсовыми пленками 1, 3 и 6 после цинкования имели цинковые пленки на всех отверстиях, что говорит о недостаточном растекании расплава по поверхности офлюсованного образца.

Внешний вид покрытия с чистыми отверстиями представлен на рис. 3, а, с отверстиями, затянатыми цинковой пленкой, – на рис. 3, б.

Лучшие результаты растекания расплава цинка по офлюсованной стали показали флюсы 2, 4, 5 с соотношением основных компонентов: 21 %  $ZnCl_2$  – 20 %  $NH_4Cl$ .

Металлографические исследования поперечного сечения цинкового покрытия, полученного на офлюсованных образцах, показали, что микроструктура покрытия на образцах всех составов флюсов идентична. Покрытия состоят из основных интерметаллидных фаз, имеют равномерную толщину. Трещины и отслоения от основы отсутствуют.

С учетом полученного качества цинкового покрытия на всех образцах можно сделать вывод, что при применении всех флюсов формируется цинковое покрытие, однако растекание расплава цинка лучше обеспечивает флюс 4, так как именно при его применении все отверстия, включая навесное диаметром 4 мм, процинкованы.

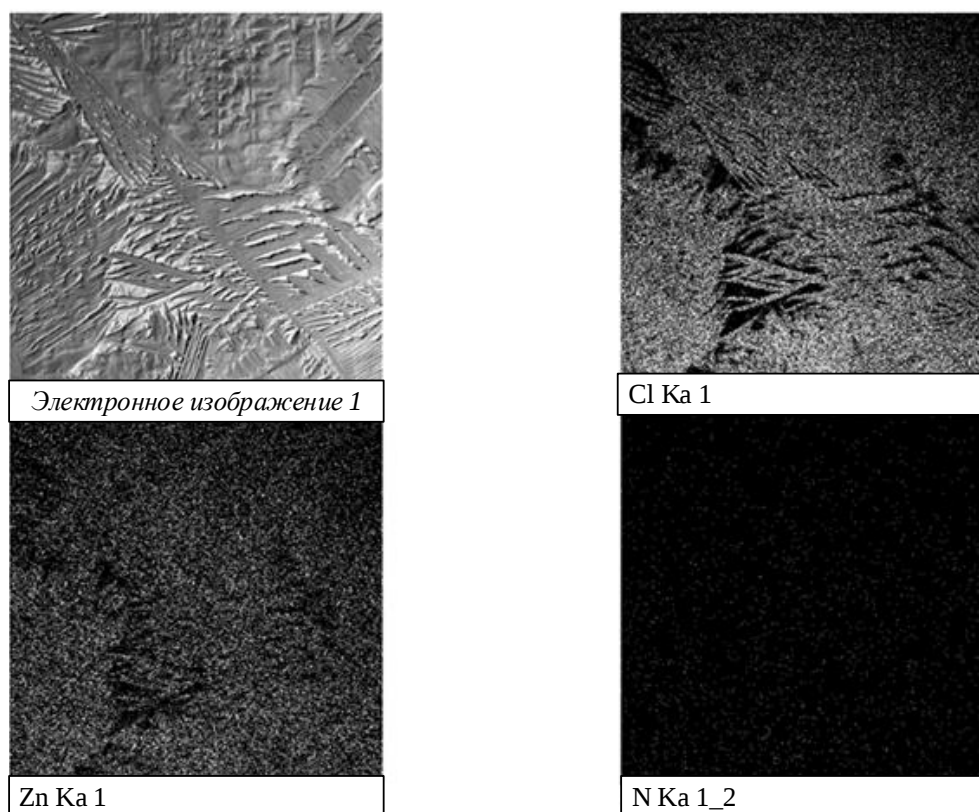


Рис. 2. Карты распределения компонентов флюса 4 на поверхности стали  
Fig. 2. Distribution maps of flux components 4 on the steel surface

**Выводы**

Расчет углов смачивания показал, что все представленные флюсы обладают хорошими смачивающими свойствами поверхности: угол составляет меньше  $90^\circ$  и находится в пределах от  $32$  до  $37^\circ$ .

Исследования распределения элементов флюсов по стальной поверхности показали, что у большинства флюсов выражен «морозный» рисунок кристаллизации хлорида цинка, за исключением флюса 6 (модифицирован никелем, марганцем, калием). Наиболее равномерное распределение хлорида цинка наблюдается при ис-

пользовании флюса 4 (с более полной сорбцией примесей).

Визуальная оценка качества цинкового покрытия, формирующегося после флюсования, показала, что наилучшая процинковка отверстий диаметром 10 мм обеспечивается при использовании флюсов 2 (модифицированный никелем), 4 (с более полной сорбцией примесей) и 5 (модифицированный  $\text{SO}_4$ ). Эти флюсы отличаются соотношением основных компонентов: 21 %  $\text{ZnCl}_2$  и 20 %  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . При использовании флюса 4 получается чистое подвесное отверстие диаметром 4 мм.

Т а б л и ц а 3

Среднее содержание компонентов флюсов  
Table 3. The average content of flux components

| Флюс | Содержание элемента, % (по массе) |       |      |      |       |      |       |      |      |      |
|------|-----------------------------------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|
|      | N                                 | Cl    | K    | Mn   | Fe    | Ni   | Zn    | O    | S    | Ca   |
| 1    | 6,80                              | 39,78 |      |      | 36,30 |      | 17,12 |      |      |      |
| 2    | 6,90                              | 35,26 |      |      | 43,28 | 0,64 | 13,84 |      |      | 0,23 |
| 3    | 8,50                              | 54,59 |      |      | 13,14 |      | 23,71 |      |      |      |
| 4    | 7,15                              | 48,55 |      |      | 25,33 |      | 18,97 |      |      |      |
| 5    | 6,40                              | 38,04 |      |      | 36,93 |      | 14,43 | 3,84 | 0,36 |      |
| 6    | 5,52                              | 47,44 | 0,66 | 3,43 | 27,95 | 0,06 | 14,94 |      |      |      |

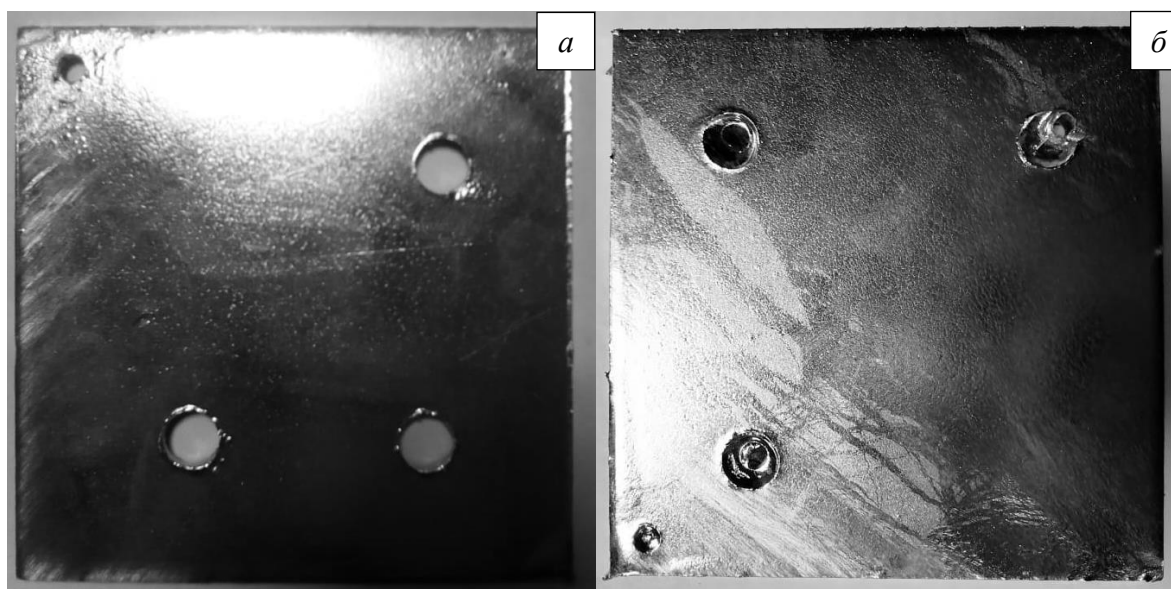


Рис. 3. Оцинкованный образец с чистыми отверстиями (а) и с затянутыми цинковой пленкой (б)  
Fig. 3. Galvanized sample with clean holes (a), with zinc film tightened (b)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Знаменский Ю.П. Цинкование погружением (Hot-dip). Интернет-обзор по современным методам горячего цинкования. Обнинск, 2012:546.
2. Marder A.R., Goodwin F.E. the metallurgy of zinc coated steels. Elsevier Inc. All rights reserved. 2023:590. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-04502-0>
3. Sjoukes F. Chemical reactions in fluxes for hot dip galvanizing. *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 1990;37(4):12–14. <https://doi.org/10.1108/eb007267>
4. Xu J., Li B., Mi X. Research progress of Hot Dip-galvanizing fluxing on steel. *Hans Journal of Chemical Engineering and Technology*. 2013;6(3):71–77. <https://doi.org/10.12677/HJCET.2016.63009>
5. Zhu X., Shen Y., Ge Y., Zhang S. 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):1257. <https://doi.org/10.3390/met12081257>
6. Li Z., Peng H., Xie A. Effect of KCl–ZnCl<sub>2</sub> Ball-Milling Fluxing on Microstructure and Corrosion of Iron Ingot Hot-Dip Zinc Coating. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2023;7. <https://doi.org/10.1007/s11661-023-07051-7>
7. Boonyongmaneerat Y., Saengkiattiyut K., Rattanawaleedirojn P. Effect of NiCl<sub>2</sub> -based fluxes on interfacial layer formation of hot dip galvanized steels. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010;17(8):74–78. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60132-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60132-X)
8. Пат. № 2646303 С2 РФ, МПК C23C 2/30, C23C 2/06. Флюс для горячего цинкования стальных изделий / Королев А.А., Крестьянинов А.Т., Тимофеев К.Л.; заявл. 12.07.2016; опубл. 02.03.2018. Бюл. № 7.
9. Pistofidis N., Vourlias G., Konidaris S., Pavlidou E., Stergioudis G., Tsiapas D. The effect of preflux bath additives on the morphology and structure of the hot-dip galvanized coatings. *Crystal Research and Technology*. 2006;41(8):759–765. <https://doi.org/10.1002/crat.200510664>
10. Пат. № 2277606 С2 РФ, МПК C23C 2/06, C23C 2/12, C23C 2/30. Флюс для горячего цинкования и способ горячего цинкования / Варихет Д., Ван-Херк К., Ван-Лиерде А.; заявл. 23.11.2001; опубл. 10.06.2006. Бюл. № 16.
11. Гель В.И. Защита стальных изделий от коррозии методом погружения в расплавы цинка, алюминия и их сплавы. *Практика противокоррозионной защиты*. 2018;4(90):22–35. <https://doi.org/10.31615/J.CORROS.PROT.2018.9.0.4-3>
12. Liu T., Ma R., Fan Y., Du A., Zhao X., Wen M., Cao X. Effect of fluxes on wettability between the molten Galfan alloy and Q235 steel matrix. *Surface and Coatings Technology*. 2018;337:270–278. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.01.032>
13. Зайцева М.В., Столяров А.Ю., Черевичная М.В. Анализ процесса нанесения цинкалюминиевого покрытия Galfan при освоении новой технологии горячего цинкования на ОАО «ММК-МЕТИЗ». *Черные металлы*. 2022;(1):28–30.
14. Du A., Huo Y., Hu J. Study of Fluxing Process for Hot Dipping Galfan Alloy on Steel Wire. *Advanced Materials Research*. 2012;383-390:1901–1904. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.383-390.1901>
15. López G.A., Mittemeijer E.J., Straumal B.B. Grain boundary wetting by a solid phase; microstructural development in a Zn–5 wt% Al alloy. *Acta Materialia*. 2004;52(15):4537–4545. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.06.011>
16. Juniehi T., Nobuyuki K., Yasuhiro T. Flux for hot dip Zn-Al alloy coating. Pat. JP04–154951. 1992.
17. Kim K.OY., So S.-M., Oh M.-S. Effect of flux chloride composition on microstructure and coating properties of Zn-Mg-Al ternary alloy coated steel product. *Korean Journal of Materials Research*. 2021;31(12):704–709. <https://doi.org/10.3740/MRSK.2021.31.12.704>
18. Xu M., Zheng Zh., Han D., Ma R., Du A., Fan Y., Zhao X., Cao X. Wetting of liquid Zinc-aluminum-magnesium alloy on steel substrate during hot-dipping: Understanding the role of the flux. *Surface Topography: Metrology and Properties*. 2022;10(3)15. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/ac8f5e>
19. Wu M., Chang L., Zhang L., He X., Qu X. Effects of roughness on the wettability of high temperature wetting system. *Surface and Coatings Technology*. 2016;287:145–152. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.12.092>
20. Blumenau M., Norden M., Friedel F., Peters K. Reactive wetting during hot-dip galvanizing of high manganese alloyed steel. *Surface and Coatings Technology*. 2011;205(10):3319–3327. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.11.053>

## REFERENCES

1. Znamenskii Yu.P. Dip galvanizing (Hot-dip). Online review of the modern method of hot-dip galvanizing. Obninsk, 2012:546. (In Russ.).
2. Marder A.R., Goodwin F.E. The Metallurgy of Zinc Coated Steels. Elsevier Inc. All rights reserved. 2023:590. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-04502-0>
3. Sjoukes F. Chemical reactions in fluxes for hot dip galvanizing. *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 1990;37(4):12–14. <https://doi.org/10.1108/eb007267>
4. Xu J., Li B., Mi X. Research progress of Hot Dip-galvanizing fluxing on steel. *Hans Journal of*

- Chemical Engineering and Technology. 2013;6(3):71–77. <https://doi.org/10.12677/HJCET.2016.63009>
5. Zhu X., Shen Y., Ge Y., Zhang S. 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):1257. <https://doi.org/10.3390/met12081257>
  6. Li Z., Peng H., Xie A. Effect of KCl–ZnCl<sub>2</sub> Ball-Milling Fluxing on Microstructure and Corrosion of Iron Ingot Hot-Dip Zinc Coating. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2023;7. <https://doi.org/10.1007/s11661-023-07051-7>
  7. Boonyongmaneerat Y., Saengkiattiyut K., Rattanawaleedirojn P. Effect of NiCl<sub>2</sub> -based fluxes on interfacial layer formation of hot dip galvanized steels. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010;17(8):74–78. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60132-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60132-X)
  8. Korolev A.A., Krest'yaninov A.T., Timofeev K.L. Flux for hot-dip galvanizing of steel products. Pat. RF 2646303 C2. *Byulleten' izobretenii*. 2006; no. 7. (In Russ.).
  9. Pistofidis N., Vourlias G., Konidaris S., Pavlidou E., Stergioudis G., Tsipas D. The effect of preflux bath additives on the morphology and structure of the hot-dip galvanized coatings. *Crystal Research and Technology*. 2006;41(8):759–765. <https://doi.org/10.1002/crat.200510664>
  10. Varikhet D., Van-Kherk K., Van-Lierde A. Hot-dip galvanizing flux and hot-dip galvanizing method. Pat. RF 2277606 C2. *Byulleten' izobretenii*. 2006; no. 16. (In Russ.).
  11. Gel' V.I. Protection of steel products from corrosion by immersion in molten zinc, aluminum and their alloys. *Praktika protivokorroziionnoi zashchity*. 2018;4(90):22–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.31615/J.CORROS.PROT.2018.9.0.4-3>
  12. Liu T., Ma R., Fan Y., Du A., Zhao X., Wen M., Cao X. Effect of fluxes on wettability between the molten Galfan alloy and Q235 steel matrix. *Surface and Coatings Technology*. 2018;337:270–278. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.01.032>
  13. Zaitseva M. V., Stolyarov A. Yu., Cherevichnaya M. V. A the analysis of the process of applying the Galfan zinc-aluminum coating during the development of a new hot-dip galvanizing technology at OJSC MMK-METIZ. *Chernye metally*. 2022(1):28–30. (In Russ.).
  14. Du A., Huo Y., Hu J. Study of Fluxing Process for Hot Dipping Galfan Alloy on Steel Wire. *Advanced Materials Research*. 2012;383-390:1901–1904. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.383-390.1901>
  15. López G.A., Mittemeijer E.J., Straumal B.B. Grain boundary wetting by a solid phase; microstructural development in a Zn–5 wt% Al alloy. *Acta Materialia*. 2004;52(15):4537–4545. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.06.011>
  16. Juniehi T., Nobuyuki K., Yasuhiro T. Flux for hot dip Zn-Al alloy coating. Pat. JP04–154951. 1992.
  17. Kim K.O.Y., So S.-M., Oh M.-S. Effect of flux chloride composition on microstructure and coating properties of Zn-Mg-Al ternary alloy coated steel product. *Korean Journal of Materials Research*. 2021;31(12):704–709. <https://doi.org/10.3740/MRSK.2021.31.12.704>
  18. Xu M., Zheng Zh., Han D., Ma R., Du A., Fan Y., Zhao X., Cao X. Wetting of liquid Zinc-aluminum-magnesium alloy on steel substrate during hot-dipping: Understanding the role of the flux. *Surface Topography: Metrology and Properties*. 2022;10(3)15. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/ac8f5e>
  19. Wu M., Chang L., Zhang L., He X., Qu X. Effects of roughness on the wettability of high temperature wetting system. *Surface and Coatings Technology*. 2016;287:145–152. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.12.092>
  20. Blumenau M., Norden M., Friedel F., Peters K. Reactive wetting during hot-dip galvanizing of high manganese alloyed steel. *Surface and Coatings Technology*. 2011;205(10):3319–3327. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.11.053>

#### Сведения об авторах

**Ольга Сергеевна Бондарева**, к.т.н., доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева

**E-mail:** osbond@yandex.ru

**ORCID:** 0000-0002-4273-2483

**Ольга Сергеевна Добычина**, аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, руководитель отдела научно-технических разработок в области антикоррозионной защиты ОАО «Завод Промдмаш», Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева

**E-mail:** o.dobychina@zvpm.ru

**ORCID:** 0000-0001-6330-5758

**Владимир Георгиевич Пономарев**, к.х.н., директор по техническому развитию, ООО «Промхимпермь»

**E-mail:** pvg@promchim.com

**ORCID:** 0009-0004-9411-8196

**Елизавета Евгеньевна Вдовина**, студент, Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева

**E-mail:** Elizabeth.Elizabeth2002@yandex.ru

**ORCID:** 0009-0006-5409-2520

**Дарья Игоревна Лазунина**, студент, Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева

**E-mail:** daralazunina@gmail.com

**ORCID:** 0009-0005-8800-8318

**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

**Olga S. Dobychina**, *graduate student of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science*, Head of the department of scientific and technical developments in the field of anti-corrosion protection of Prodmash Plant, Samara National Research University

**E-mail:** o.dobychina@zvpm.ru

**ORCID:** 0000-0001-6330-5758

**Vladimir G. Ponomarev**, *Cand. Sci. (Chem.)*, Director of Technical Development, «Promkhimperm LLC»

**E-mail:** pvg@promchim.com

**ORCID:** 0009-0004-9411-8196

**Elizaveta E. Vdovina**, *student*, Samara National Research University

**E-mail:** Elizabeth.Elizabeth2002@yandex.ru

**ORCID:** 0009-0006-5409-2520

**Daria I. Lazunina**, *student*, Samara National Research University

**E-mail:** daralazunina@gmail.com

**ORCID:** 0009-0005-8800-8318

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 15.11.2023

После доработки 04.12.2023

Принята к публикации 06.12.2023

Received 15.11.2023

Revised 04.12.2023

Accepted 06.12.2023