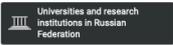




Chernye Metally

| COUNTRY | SUBJECT AREA AND CATEGORY | PUBLISHER | H-INDEX |
|--|---|---|--|
| Russian Federation   | Materials Science – Metals and Alloys | Ore and Metals Publishing house | 13 |
| PUBLICATION TYPE | ISSN | COVERAGE | INFORMATION |
| Journals | 01320890, 24140104 | 2016-2022 | Homepage chermet@rudmet.ru |

SCOPE

The features of "Chernye Metally" journal are based on publishing materials about up-to-date scientific innovations both national and foreign metallurgists; it allows to compare them demonstrably and to get full information about current state and development tendencies of iron and steel industry in Russia and abroad. Such editorial practice is rather popular among the readership. "Chernye Metally" journal publishes both separate articles about innovations in the field of iron and steel industry and experience of their putting into practice at metallurgical works, and also complex collections of materials on plants and technological directions. The topics of publications covers whole area of metallurgical production from iron- and steel making, casting and rolling to finishing, heat treatment and coating of metal products. Serious attention is paid in the journal to up-to-date technological processes (such as metal shape memory, superductility, manufacture of large diameter tubes, micro-mills etc), as well as actual problems of environment protection, resource saving and training of specialists.

Join the conversation about this journal



ISSN 0132-0890
www.rudmet.ru

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издается с 1961 года
(№ 1102)

10.2023



*Тема номера:
85 лет кафедре
механики и машиностроения
Сибирского государственного
индустриального университета (стр. 15-54)*

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 10 (1102), октябрь 2023 г.

Издается с 1961 г.

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения

Учредители:

Акционерное общество
«Издательский дом
«Руда и Металлы»

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Федеральное бюджетное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г. И. Носова»

При участии:

ПАО «ММК»
ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия»
имени С. П. Королева»
ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК»
ФГБУК «Государственный Эрмитаж»

Официальный информационный орган
Федерального УМО
«Технологии материалов»

Редакционный совет:

Главный редактор: В. М. Колокольцев
Первый зам. главного редактора: К. Л. Косырев
Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников, А. Г. Воробьев
А. М. Беленький, В. Блек (Германия), Ю. Л. Бобарикин (Беларусь), О. И. Борискин, И. В. Буторина,
Р. М. Валеев, Е. П. Волынкина, А. В. Выдрин, С. П. Галкин, Е. А. Голи-Оглу (Дания), Я. М. Гордон (Канада),
Д. Г. Еланский, Н. А. Зюбан, И. Е. Илларионов, Л. М. Капуткина, А. А. Казаков, А. П. Коликов,
С. В. Коновалов, А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарв, И. О. Леушин, И. П. Мазур, Т. Н. Матвеева, А. В. Мунтин,
А. Е. Пелевин, Ю. Ю. Пиотровский, И. М. Потравный, А. Н. Савенок (Беларусь), А. В. Серебряков,
Е. Ю. Сидорова, И. А. Султангузин, А. Я. Травянов, А. С. Харченко, Н. А. Чиченев, М. В. Чукин,
И. В. Чуманов, А. Н. Шаповалов, П. Шеллер (Германия), Е. А. Яценко

Редакция:

Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников
Ответственный секретарь: Е. Ю. Рахманова

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»
Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 622

Адрес редакции:

• фактический: 119049, Москва, Ленинский проспект 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 617
• почтовый: 119049, Москва, а/я № 71
Телефон/факс: (495) 955-01-75
Эл. почта: chernet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru
www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения
«Черные металлы» № 10 (1102), октябрь 2023 г.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(Свидетельство ПИ № ФС77-48681 от 28.02.2012 г.)

Товарный знак и название «Черные металлы» являются исключительной
собственностью Издательского дома «Руда и Металлы»

Отпечатано с предоставленных готовых файлов
в типографии «Канцлер»
150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16, стр. 66А.
Тел. (4852) 58-76-33

Дата выхода в свет: 25.10.2023. Формат 60x90/8.
Печ. л. 12,75. Офсетная печать. Бумага офсетная.
Тираж 800 экз. Цена свободная

За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель
За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор
Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции
При перепечатке ссылка на «Черные металлы» обязательна
«Реклама» — материал публикуется на правах рекламы
Публикуемые материалы не обязательно отражают точку зрения редакции
и редсовета журнала

Подписной индекс:
12985 («Пресса России»)

ISSN 0132-0890



9 770132 089006 >

СОДЕРЖАНИЕ

Обогащение руд

- А. Е. Пелевин.* Повышение качества концентрата путем применения тонкого грохочения в стадиях измельчения железных руд 4

Производство стали

- Г. П. Вяткин, М. А. Матвеева, И. В. Чуманов, И. М. Ячиков.* Математическое моделирование влияния места доставки капель электродного металла на глубину металлической ванны при электрошлаковом переплаве 10

85 лет кафедре механики и машиностроения

Сибирского государственного индустриального университета

- А. Н. Савельев, С. В. Коновалов.* Кафедра механики и машиностроения: 85 лет подготовки инженеров-механиков для металлургической промышленности Сибири и Дальнего Востока. 15
- А. А. Уманский, Р. Н. Молоканов, В. В. Дорофеев.* Совершенствование профиля рельсов с целью оптимизации напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути в процессе эксплуатации 19
- В. Е. Громов, С. В. Коновалов, М. А. Порфириев, О. А. Перегудов.* Формирование дефектной структуры перлита в головке рельсов из заэвтектоидной стали при эксплуатации 26
- А. Г. Никитин, В. Н. Бережанский.* Расчет деформации упругих пневматических элементов при ударной нагрузке. 31
- О. С. Бондарева, О. С. Добычина, М. О. Дмитриева, С. В. Коновалов.* Сравнительный анализ структуры и электрохимических свойств цинковых покрытий для прогнозирования возникновения контактной коррозии на крепеже 35
- Л. Н. Гудимова.* Создание самоустанавливающейся структуры механизма металлургических ножниц с параллельными ножами 42
- Л. Н. Гудимова, И. А. Серебряков.* Исследование плавности хода зубчатого одноподвижного плоского планетарного механизма при применении уравновешенной конструкции водила. 49

К 75-летию С. И. Жульева, основателя научной школы технологии материалов в Волгоградском ГТУ

- Н. А. Зюбан.* Памяти Сергея Ивановича Жульева 55
- С. Б. Гаманюк, Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, М. В. Кириличев.* Моделирование процесса затвердевания кузнечного слитка при доливке прибыльной части расплавом 57
- Л. В. Палаткина, В. В. Галаган, М. В. Матасова, М. Ю. Чубуков.* Влияния электромагнитного перемешивания на процессы кристаллизации сплава и макро- и микроструктуру непрерывнолитых заготовок для производства сероводородостойких труб 63
- Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, М. С. Никитин, М. В. Кириличев.* Исследование и анализ причин зарастания сталеразливочного тракта при получении стали С45Е 70
- О. Б. Крючков, П. И. Маленко, Л. Г. Саранин, А. Е. Болдырев.* Экспериментально-расчетное исследование температурного поля в нагреваемом под пластическую деформацию блюме с использованием физического моделирования. 78

Металловедение и физика металлов

- А. В. Даниленко, А. В. Мунтин, А. А. Хлыбов.* Методика оценки склонности металла к трещинообразованию при различных режимах прокатки 85

Производство труб

- А. С. Алещенко, К. Нгуен, Ю. В. Гамин, А. Р. Шамилов.* Исследование износостойкости оправок при раскатке труб из стали 20Х13 93

Экология и рециклинг

- О. В. Максимова, В. А. Филичкина, Ю. В. Сомова.* Анализ динамики выбросов черного углерода на территории, прилегающей к Магнитогорскому металлургическому комбинату 98

Журнал "Черные металлы"

по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен в
"Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук"

Сравнительный анализ структуры и электрохимических свойств цинковых покрытий для прогнозирования возникновения контактной коррозии на крепеже

О. С. Бондарева, доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения (ТМиАМ)¹, канд. техн. наук, эл. почта: osbond@yandex.ru

О. С. Добычина, аспирант кафедры ТМиАМ¹, эл. почта: o.dobychina@zvpm.ru

М. О. Дмитриева, профессор кафедры ТМиАМ¹, эл. почта: mdmitr1ewa@yandex.ru

С. В. Коновалов, профессор кафедры ТМиАМ¹, проректор по научной и инновационной деятельности, заведующий кафедрой механики и машиностроения², докт. техн. наук, профессор, эл. почта: konovalov@sibsiu.ru

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия.

²Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.

Исследованы элементный состав и структура цинковых покрытий, полученных гальваническим цинкованием, горячим цинкованием в расплаве цинка при температурах 450 и 590 °С и в расплаве Гальфан (Zn + 5 % Al), термодиффузионным цинкованием в порошковой смеси, газотермическим напылением порошка цинка, а также цинк-ламельного покрытия и покрытия ZINKER на полимерном связующем. Металлографические исследования показали, что поверхность и структура цинковых покрытий различается в зависимости от способа нанесения покрытия. Методом энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа установлено, что содержание цинка на поверхности покрытий различается. Поверхность покрытия, полученного горячим цинкованием при температуре 450 °С, представлена практически чистым цинком, а на поверхности высокотемпературного (590 °С) горячецинкового покрытия и термодиффузионного цинкового покрытия находятся железо-цинковые фазы с разным соотношением железа и цинка. Остальные покрытия имеют на поверхности примесные элементы, что связано с условиями их получения. Для прогнозирования электрохимических свойств покрытий измерены их стандартные электродные потенциалы. Построен ряд химических напряжений для различных цинковых покрытий. Установлено, что при контакте цинковых покрытий между собой в присутствии электролита могут реализовываться следующие варианты электрохимического взаимодействия. Покрытия цинк-ламельное, ZINKER и Гальфан окисляются в гальванической паре с горячеоцинкованными при температуре 450 °С изделиями, осуществляя катодную защиту. Термодиффузионное цинковое покрытие не образует гальванической пары с горячецинковым покрытием. Гальваническое, газотермическое и высокотемпературное горячецинковое покрытия восстанавливаются в паре с горячецинковым покрытием. Полученные данные необходимо учитывать при использовании изделий с различными цинковыми покрытиями в узлах соединений деталей.

Ключевые слова: горячее цинкование, Гальфан, цинк-ламельное покрытие, термодиффузионное покрытие, гальваническое покрытие, газотермическое напыление, контактная коррозия, стандартный электродный потенциал.

DOI: 10.17580/chm.2023.10.06

Введение

В настоящее время практически весь строительный и автомобильный крепеж выпускают с защитным антикоррозионным покрытием. В основном используют цинковые покрытия, нанесенные различными методами: гальваническое, горячее и термодиффузионное цинкование, газотермическое напыление цинка. Также применяют полимерсодержащие цинк-ламельное покрытие и покрытие ZINKER. У каждого метода есть свои преимущества и недостатки [1, 2]. Гальванические цинковые покрытия являются самыми доступными и распространенными, однако этот способ нанесения приводит к водородному охрупчиванию высокопрочных болтов [3]. Кроме того, из-за малой толщины и недостаточной прочности сцепления с основой такой крепеж больше подходит для использования в помещениях. Горячее цинкование широко применяют для цинкования строительных крупногабаритных конструкций. Однако при

цинковании крепежа производители сталкиваются с проблемой большой толщины покрытий на резьбе, из-за чего требуются дополнительная операция по прослаблению резьбы перед цинкованием и использование технологии высокотемпературного цинкования для получения тонкого покрытия [4, 5]. Использование расплава Гальфан (Zn + 5 % Al) позволяет получать более тонкие покрытия с повышенной коррозионной стойкостью по сравнению с покрытиями, полученными горячим цинкованием в чистом цинке [6]. Термодиффузионное цинкование для нанесения покрытия на крепеж, в том числе и высокопрочный, позволяет получать покрытие с высокой адгезионной прочностью и коррозионной стойкостью [7, 8]. К недостаткам такого покрытия можно отнести отсутствие у него блеска и наличие забоев на резьбе, вызванные соударением болтов при вращении контейнера. Цинковые покрытия, полученные газотермическим напылением, имеют хорошие характеристики: низкую

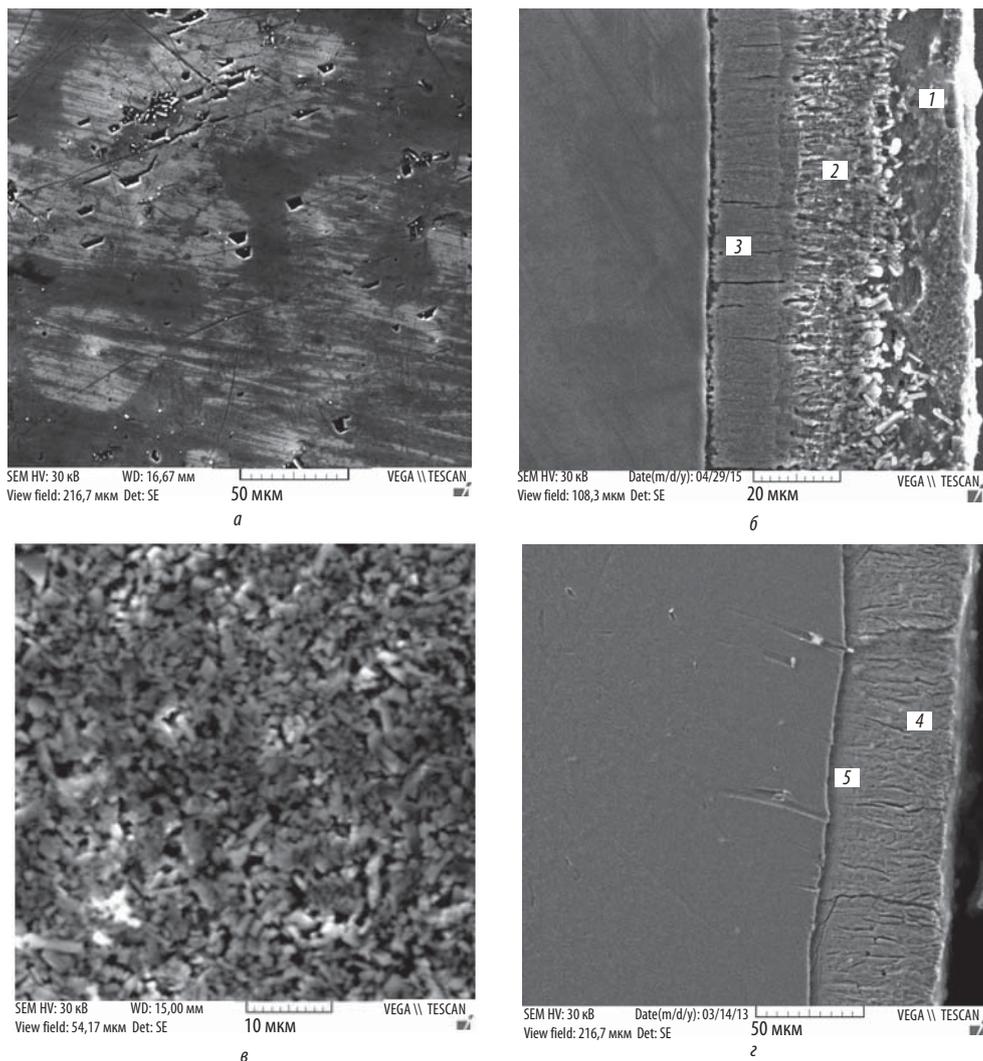


Рис. 1. Структура покрытия, полученного горячим цинкованием в расплаве цинка при температуре 450 (а, б) и 590 (в, г) °С: а, в — поверхность; б, г — поперечное сечение

пористость, высокие адгезионную прочность и коррозионную стойкость при правильно подобранной температуре и скорости напыления [9]. Для автомобильного крепежа широко применяют цинк-ламелльное покрытие, представляющее ламели цинка и алюминия в полимерном связующем с обязательной полимеризацией при температуре 230 °С. Связующее может быть различным в зависимости от производителя. Покрытие характеризуется высокими механическими показателями и стойкостью к коррозии [10, 11]. Популярно новое покрытие ZINKER в виде цинкового порошка в органическом связующем, не требующее термической обработки и наносимое кистью, как краска [12].

При таком разнообразии крепежных изделий с цинковыми покрытиями возникает вопрос о гальванической совместимости крепежа с деталями конструкций, если принять, что в основном металлоконструкции подвергаются горячему цинкованию. Известно, что при контакте металлов, имеющих разные электродные потенциалы, в присутствии проводящей среды возникает гальваническая пара, что приводит к образованию контактной коррозии. Соприкасающиеся металлические материалы должны по возможности иметь минимальную

Таблица 1

Элементный состав цинковых покрытий, полученных горячим цинкованием в расплаве цинка при температурах 450 и 590 °С

| Спектр | Содержание, % (мас.) | | |
|--------|----------------------|--------|-------|
| | Fe | Zn | Всего |
| 1 | 0,003 | 99,997 | 100 |
| 2 | 6,57 | 93,43 | 100 |
| 3 | 9,45 | 90,55 | 100 |
| 4 | 9,12 | 90,88 | 100 |
| 5 | 11,33 | 88,67 | 100 |

разность стандартных потенциалов. Значения стандартных электродных потенциалов позволяют предсказать, какой металл из выбранной пары будет разрушаться (анод), а также оценить степень опасности коррозионного процесса. Допустимые и недопустимые контакты металлов определяют согласно ГОСТ 9.005–72 [13]. Однако данные по совместимости цинковых покрытий, полученных различными способами,

отсутствуют. Измерение и сравнение стандартных электродных потенциалов для различных покрытий позволяют оценить вероятность возникновения контактной коррозии при использовании разных цинковых покрытий на крепеже и основных соединяемых деталях [14–16].

Целью данной работы является изучение структуры и элементного состава цинковых покрытий, полученных различными способами, а также сравнительный анализ стандартных электродных потенциалов покрытий для прогнозирования возникновения контактной коррозии при их соединении.

Материалы и методика исследования

Для исследования использовали гайки и болты с цинковыми покрытиями, полученными гальваническим цинкованием, горячим цинкованием в расплаве цинка при температурах 450 и 590 °С и в расплаве Гальфан при температуре 400 °С, термодиффузионным цинкованием в порошковой смеси, газотермическим сверхзвуковым напылением порошка цинка в струе продуктов сгорания углеводородного топлива в сжатом воздухе, а также с полимерсодержащими цинк-ламельным покрытием и покрытием ZINKER. Все покрытия наносили в производственных условиях на промышленных

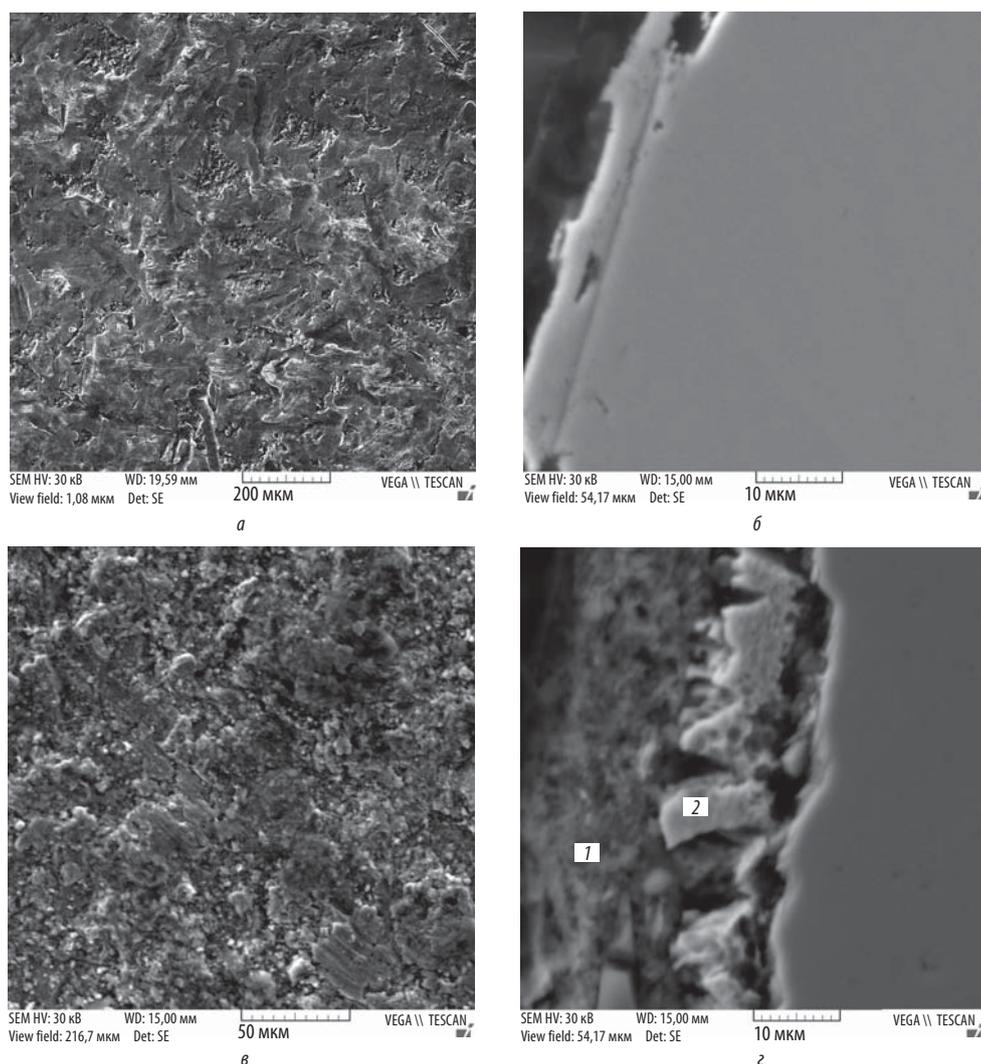


Рис. 2. Структура гальванического (а, б) и термодиффузионного (в, з) цинкового покрытия: а, в — поверхность; б, з — поперечное сечение

Таблица 2

Элементный состав термодиффузионного цинкового покрытия

| | Элемент, % (мас.) | | | | | | | | |
|----------------------|-------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| | O | Al | Si | Fe | Zn | P | Cl | Ca | Ti |
| Поверхность покрытия | 13,43 | 0,79 | 5,63 | 13,26 | 63,41 | 0,94 | 0,34 | 1,41 | 0,80 |
| Спектр 1 | – | – | – | 4,04 | 95,96 | – | – | – | – |
| Спектр 2 | – | – | – | 14,93 | 85,07 | – | – | – | – |

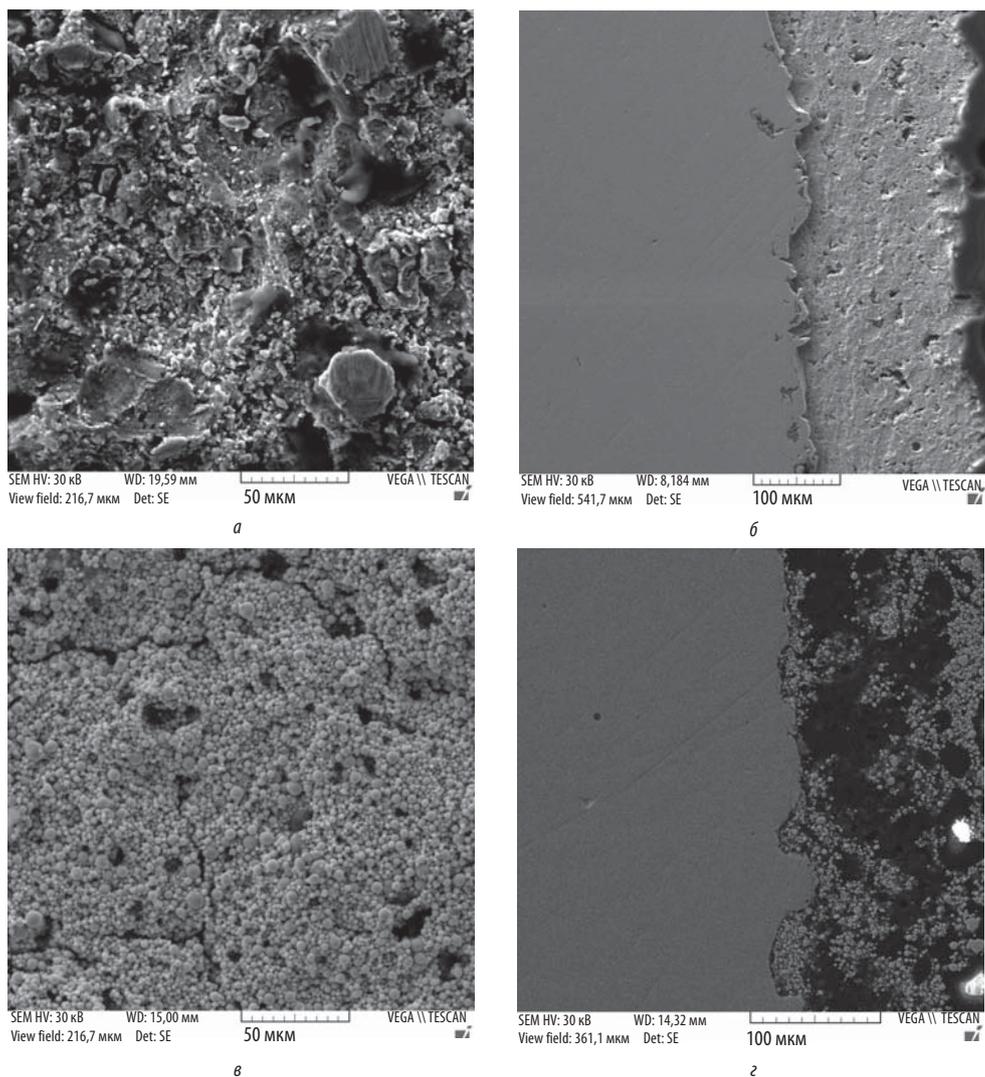


Рис. 3. Структура газотермического цинкового покрытия (а, б) и покрытия ZINKER (в, г): а, в — поверхность; б, г — поперечное сечение

Таблица 3

Элементный состав поверхности газотермического цинкового покрытия и покрытия ZINKER

| Покрытие | Элемент, % (мас.) | | | | | | | | Всего |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | C | O | Al | Si | Cl | K | Fe | Zn | |
| Газотермическое | – | 4,26 | 0,70 | 0,61 | 0,39 | 0,24 | 1,44 | 92,35 | 100 |
| ZINKER | 16,75 | 2,55 | – | – | – | – | – | 80,7 | 100 |

установках. Шлифы для изучения микроструктуры изготавливали на шлифовально-полировальном станке Remet LS 2.

Элементный состав и структуру покрытий изучали с применением сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA SB с приставкой OXFORD INCA X-Act. Стандартный электродный потенциал измеряли при помощи электропотенциометра.

Результаты исследования и их обсуждение

Структура поверхности и поперечного сечения покрытий, полученных горячим цинкованием в расплаве цинка при температурах 450 и 590 °С, показана на **рис. 1**.

В покрытии, полученном в расплаве цинка при температуре 450 °С, наблюдают три фазы, отличающиеся строением и соотношением железа и цинка. Поверхность покрытия представлена практически чистым цинком. В покрытии, полученном в расплаве цинка при температуре 590 °С, присутствует две фазы с различным соотношением железа и цинка. Поверхность покрытия представлена интерметаллидными кристаллитами. Элементный анализ фаз приведен в **табл. 1**.

Структура поверхности и поперечное сечение гальванического и термодиффузионного покрытий показаны на **рис. 2**.

В гальваническом покрытии наблюдается одна фаза с содержанием цинка около 75 %, также обнаружены следы хрома из пассиватора и хлора из электролита. Элементный состав гальванического цинкового покрытия, % (мас.): 75,31 Zn; 18,32 Fe; 5,58 O; 0,54 Cl; 0,26 Cr.

Поверхность термодиффузионного покрытия неровная, в поперечном сечении различимы две железо-цинковые фазы. На поверхности покрытия содержание цинка составляет 63,41 %. Элементный состав представлен в **табл. 2**.

Структура поверхности и поперечное сечение газотермического цинкового покрытия и покрытия ZINKER показаны на **рис. 3**.

Исследования структуры показали, что газотермическое покрытие представлено одним плотным слоем из деформированных частиц порошка цинка. В поперечном сечении наблюдаются единичные поры. В покрытии ZINKER порошок цинка сохраняет исходную сферическую форму без деформации. На поверхности наблюдаются поры и трещины, в поперечном сечении есть протяженные области, не содержащие порошок, заполненные связующим. Элементный состав покрытий приведен в **табл. 3**.

Структура поверхности и поперечное сечение цинк-ламельного покрытия и покрытия, полученного горячим цинкованием в расплаве Гальфан, показаны на **рис. 4**.

Оба покрытия, кроме цинка, содержат также алюминий, однако принципиально отличаются технологией нанесения. Структурные исследования показали, что поверхность цинк-ламельного покрытия представлена плоскими частицами (см. рис. 4, а). В поперечном сечении различимы тонкие слои ламелей цинка и алюминия (см. рис. 4, б).

Элементный состав цинк-ламельного покрытия, % (мас.): 72,39 Zn; 10,41 O; 4,55 Al; 4,54 Ti; 3,67 Si; 3,39 Fe; 0,69 Cl; 0,36 K.

Покрытие Гальфан образуется при кристаллизации расплава Zn + 5 % Al, поэтому поверхность и поперечное сечение являются плотным слоем с выраженной зеренной структурой (см. рис. 4, в). Зерна имеют четкие границы и разную структуру. Часть зерен представляет собой однородный твердый раствор, а другие — эвтектическую смесь (см. рис. 4, з).

Элементный состав фаз покрытия Гальфан представлен в **табл. 4**.

Таким образом, все представленные покрытия имеют разный химический состав поверхностного слоя, несмотря

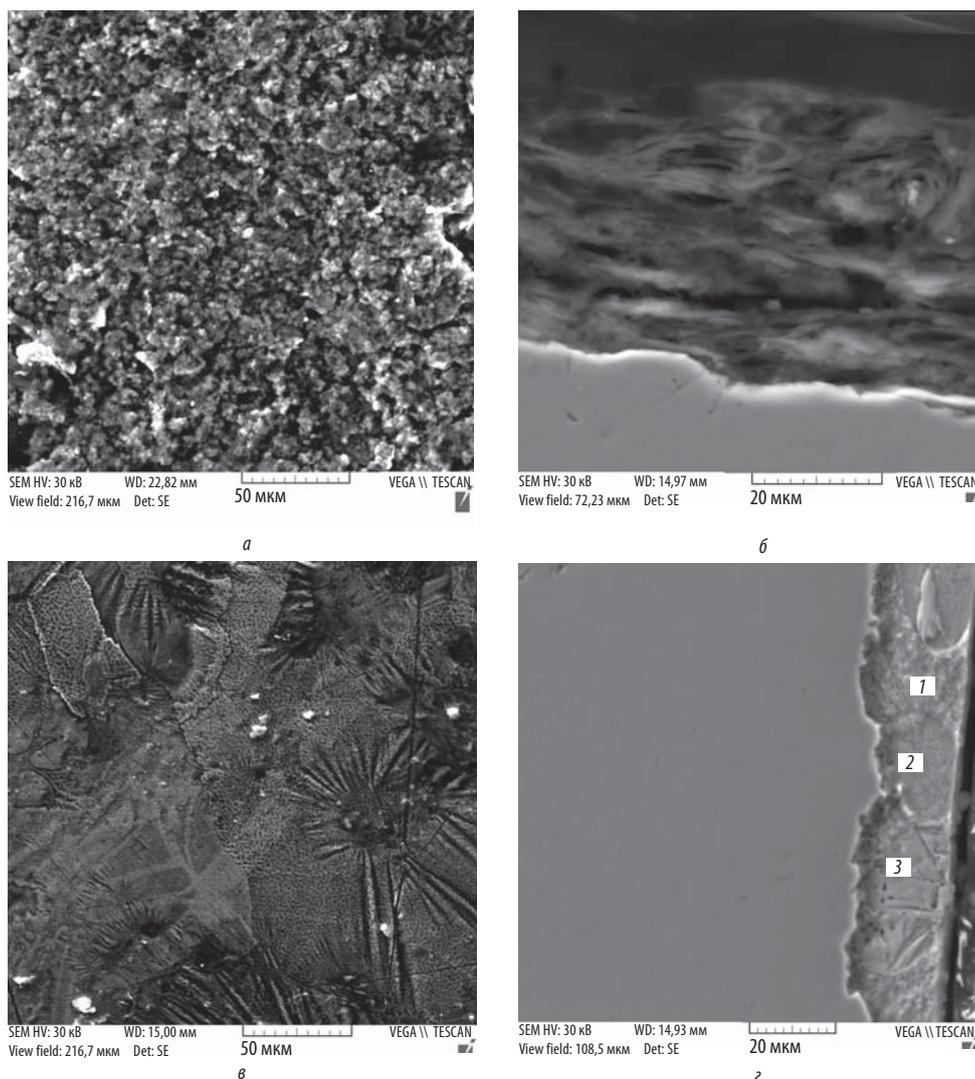


Рис. 4. Структура цинк-ламельного покрытия (а, б) и покрытия Гальфан (в, з): а, в — поверхность; б, з — поперечное сечение

Таблица 4

Элементный состав покрытия Гальфан

| Спектр | Al | Fe | Zn | Всего |
|--------|-------|------|-------|-------|
| 1 | 2,43 | 1,92 | 95,65 | 100 |
| 2 | 26,07 | 1,43 | 72,50 | 100 |
| 3 | 2,21 | 1,88 | 95,91 | 100 |

Таблица 5

Стандартные электродные потенциалы цинковых покрытий, В

| Цинк-ламельное покрытие | ZINKER | Гальфан Zn + 5 % Al | Горячее цинкование (450 °С) | Термодиффузионное цинковое покрытие | Гальваническое покрытие | Газотермическое покрытие | Горячее цинкование, (590 °С) | Fe (справочник) | Ст3 с окисной пленкой |
|-------------------------|--------|---------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------------|
| -0,789 | -0,760 | -0,733 | -0,726 | -0,722 | -0,706 | -0,688 | -0,630 | -0,440 | -0,220 |

на то, что основной компонент покрытия — цинк. Этот факт непосредственно влияет на электрохимические процессы, протекающие при контакте покрытия с другими материалами в присутствии электролита. Для прогнозирования свойств покрытий измерили их стандартные электродные потенциалы (СЭП).

Известно, что чем отрицательнее значение СЭП металла, тем выше его восстановительная способность и ниже окислительная способность его катионов. Расположение металлов в порядке возрастания их стандартных электродных потенциалов представляет ряд напряжений металлов, позволяющий проводить сравнительную оценку их химических свойств. Ряд напряжений чистых металлов доступен в справочной литературе. Измеренные стандартные электродные потенциалы цинковых покрытий, а также чистого железа и Ст3 с естественной окисной пленкой в порядке возрастания приведены в **табл. 5**.

Анализ полученных данных показал, что СЭП всех цинковых покрытий меньше чем чистого железа и стали Ст3 с окисной пленкой, т. е. покрытия осуществляют так называемую катодную защиту, что соответствует известным данным. Однако при контакте цинковых покрытий между собой могут осуществляться разные варианты гальванических пар. Если, например, основные конструкции оцинкованы методом горячего цинкования при температуре 450 °С и соединены между собой крепежом с другими видами цинкового покрытия, то реализуются следующие варианты электрохимического взаимодействия: цинк-ламельное покрытие, покрытия ZINKER и Гальфан окисляются в данной паре, осуществляя катодную защиту; термодиффузионное покрытие не образует гальванической пары с горячецинковым покрытием; гальваническое, газотермическое и высокотемпературное горячецинковое покрытие восстанавливается в паре горячецинковым покрытием.

Это явление тем заметнее, чем больше разница потенциалов между катодом и анодом. Также дополнительное влияние могут оказать исходная толщина и прочность сцепления покрытия с основой, так как возможно повреждение покрытия до начала эксплуатации и, соответственно, изменение его электрохимических свойств.



Рис. 5. Коррозия болтов с цинк-ламельным покрытием при соединении горячеоцинкованных деталей

В качестве примера данного процесса можно привести коррозию болтов с цинк-ламельным покрытием при соединении горячеоцинкованных деталей (**рис. 5**).

Заключение

Установлено, что метод нанесения цинкового покрытия оказывает значительное влияние на формирование его поверхности и внутренней структуры. Поверхность покрытия, полученного горячим цинкованием при температуре 450 °С, представляет практически чистый цинк, а на поверхности высокотемпературного (590 °С) горячецинкового покрытия и термодиффузионного цинкового покрытий находятся железо-цинковые фазы с разным соотношением железа и цинка, остальные покрытия имеют на поверхности примесные элементы, что связано с условиями их получения. Структурные особенности оказывают влияние на электрохимические свойства покрытий. Сравнительный анализ стандартных электродных потенциалов покрытий позволяет прогнозировать возникновение контактной коррозии при соединении изделий. Цинк-ламельное покрытие, покрытия ZINKER и Гальфан окисляются в гальванической паре с горячеоцинкованными при температуре 450 °С изделиями, осуществляя катодную защиту. Термодиффузионное цинковое покрытие не образует гальванической пары

с горячецинковым покрытием. Гальваническое, газотермическое и высокотемпературное горячецинковое покрытие восстанавливается в паре горячецинковым покрытием. Полученные данные необходимо учитывать при использовании изделий с различными цинковыми покрытиями в узлах соединений деталей. 

Библиографический список

1. Полькин В. И. Цинк для защиты от коррозии // *Фундаменты*. 2021. № 1 (3). С. 68–71.
2. Chung P. P., Wang J., Durand Y. Deposition processes and properties of coatings on steel fasteners – A review // *Friction*. 2019. Vol. 7. P. 389–416. DOI: 10.1007/s40544-019-0304-4.
3. Amit Khare, Sandeep Kumar Dwivedi, Manish Vishwakarma, Siraj Ahmed. Experimental investigation of hydrogen embrittlement during coating process and effect on mechanical properties of high strength steel used for fasteners // *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5, Iss. 9. Part 3. P. 18707–18715. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.217.
4. Бондарева О. С., Федорова А. В. Исследование влияния технологических параметров горячего цинкования на микроструктуру и толщину покрытия на крепежных изделиях // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2015. Т. 17. № 6-2. С. 388–391.
5. Добычина О. С., Бондарева О. С. Горячецинкованный крепеж под микроскопом // *Крепеж, клеи, инструмент и ...* 2021. № 4. С. 32, 33.
6. Mesbahzadeh A., Abdolmaleki H., Seyedraoufi Z. S. Interfacial investigation of St13/Molten Zn–5% Al and corrosion behavior of formed layer via hot-dip process // *Surf. Engin. Appl. Electrochem*. 2021. Vol. 57. P. 124–135. DOI: 10.3103/S1068375521010087.
7. Kania H., Sipa J. Microstructure characterization and corrosion resistance of zinc coating obtained on high-strength grade 10.9 bolts using a new thermal diffusion process // *Materials*. 2019. Vol. 12, Iss. 9. 1400. DOI: 10.3390/ma12091400.

“Chernye metally”, 2023, No. 10, pp. 35–41
DOI: 10.17580/chm.2023.10.06

Comparative analysis of the structure and electrochemical properties of zinc coatings to predict the contact corrosion on fasteners

Information about authors

O. S. Bondareva, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Metal Technology and Aviation Materials Science¹, e-mail: osbond@yandex.ru;

O. S. Dobychina, Postgraduate Student, Dept. of Metal Technology and Aviation Materials Science¹, e-mail: o.dobychina@zvpvm.ru;

M. O. Dmitrieva, Postgraduate Student, Dept. of Metal Technology and Aviation Materials Science¹, e-mail: mdmitriewa@yandex.ru;

S. V. Kononov, Dr. Eng., Prof., Dept. of Metal Technology and Aviation Materials Science¹, Vice-rector for Scientific and Innovative Activities, Head of the Dept. of Mechanics and Mechanical Engineering², e-mail: kononov@sibsiiu.ru

¹Samara University, Samara, Russia.

²Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.

Abstract: The elemental composition and structure of zinc coatings obtained by galvanizing, hot-dip galvanizing in zinc melt and galvan Zn + 5% Al melt, thermal diffusion galvanizing, and gas-thermal spraying of zinc powder have been studied. And also the structure and elemental composition of the zinc lamellar coating and the ZINKER coating on a polymer binder were studied. Metallographic studies have shown that the surface and structure of zinc coatings depend on the coating method. By the method of energy-dispersive X-ray spectral microanalysis, it was found that the zinc content on the surface of the coatings differs. The surface of the coating obtained by hot-dip galvanizing at 450 °C is practically pure zinc, on the surface of the high-temperature hot-dip zinc coating and the thermal diffusion zinc coating there are iron-zinc phases with different ratios of iron and zinc, the rest of the coatings have impurity elements on the surface, which is associated with the conditions for their preparation. To predict the electrochemical properties of the coatings, their standard electrode potentials were measured. A number of chemical stresses for various zinc coatings have been built. It has been established that in the case of contact of zinc coatings with each other in the presence of an electrolyte, the following variants of electrochemical interaction can be realized. Zinc lamellar coating, ZINKER coating and Galfan are oxidized in a galvanic pair with hot-dip galvanized products at 450 °C, providing cathodic protection. Thermal diffusion zinc coating does not form a galvanic couple with hot zinc coating. Galvanic, gas-thermal and high-temperature hot-zinc coating is restored in pair with hot-zinc coating. The data obtained must be taken into account when using products with various zinc coatings in the joints of parts.

Key words: hot dip galvanizing, galfan, zinc lamellar coating, thermal diffusion coating, electroplating, thermal spraying, contact corrosion, standard electrode potential.

References

1. Polkin V. I. Zinc for corrosion protection. *Fundamenty*. 2021. No. 1 (3). pp. 68–71.

8. Сотсков Н. И. Термодиффузионное цинкование — эффективный метод антикоррозионной защиты высокопрочного крепежа. Методы контроля // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019. Т. 75. № 9. С. 1066–1076. DOI: 10.32339/0135-5910-2019-9-1066-1076.
9. Xiqiang Zhong, Ruijie Liang, Guanghua Liu, Wei Pan. Zinc coating on steel by atmosphere plasma spray and their anti-corrosion behavior // *Materials Letters*. 2022. Vol. 314. 131825. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.131825.
10. Галкин Р. В., Чумаков В. И., Наумов В. И. Термоотверждаемое цинк-ламельное покрытие на основе эпоксидной смолы // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2018. Т. 26. № 3. С. 10–17. DOI: 10.47188/0869-5326_2018_26_3_10.
11. Chuntao Li, Junfeng Wei, Mincong Chen, Xiaoxiao Guan et al. Ultralow-temperature fabrication of chromium-free zinc-aluminum coatings based on polysilazane // *Materials Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 278. 125608. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2021.125608.
12. Бочаров В. А. Защита металлоконструкций от коррозии методом цинкования // *Гидротехника*. 2022. № 1 (66). С. 74, 75. DOI: 10.55326/22278400_2022_1_66_74.
13. ГОСТ 9.005–72. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, металлические и неметаллические неорганические покрытия. Допустимые и недопустимые контакты с металлами и неметаллами. — Введ. 01.07.1973.
14. Пустов Ю. А., Калица В. И., Турсунбаева А. А. Структурное состояние и коррозионная стойкость плазменного покрытия из никелевого сплава // *Перспективные материалы*. 2018. № 7. С. 57–66. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-7-57-66.
15. Киселев В. Г., Медяный С. А. Основные закономерности влияния скачка потенциала между двумя металлами на их контактную коррозию // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2013. № 9-10. С. 89–96.
16. Сотсков Н. И., Меньщикова О. А. Прогнозирование срока службы оцинкованных крепежных изделий в водопроводных колодцах // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 10. С. 31–38. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.10.31-38.

2. Chung P. P., Wang J., Durand Y. Deposition processes and properties of coatings on steel fasteners – A review. *Friction*. 2019. Vol. 7. pp. 389–416. DOI: 10.1007/s40544-019-0304-4.
3. Amit Khare, Sandeep Kumar Dwivedi, Manish Vishwakarma, Siraj Ahmed. Experimental investigation of hydrogen embrittlement during coating process and effect on mechanical properties of high strength steel used for fasteners. *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5, Iss. 9. Part 3. pp. 18707–18715. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.217.
4. Bondareva O. S., Fedorova A. V. Study of influence of technological parameters of hot-dip galvanizing on the microstructure and thickness of the coating on fasteners. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2015. Vol. 17. No. 6-2. pp. 388–391.
5. Dobychina O. S., Bondareva O. S. Hot-dip galvanized fasteners under a microscope. *Krepezh, klei, instrument i ...* 2021. No. 4. pp. 32, 33.
6. Mesbahzadeh A., Abdolmaleki H., Seyedraoufi Z. S. Interfacial investigation of St13/Molten Zn–5% Al and corrosion behavior of formed layer via hot-dip process. *Surf. Engin. Appl. Electrochem*. 2021. Vol. 57. pp. 124–135. DOI: 10.3103/S1068375521010087.
7. Kania H., Sipa J. Microstructure characterization and corrosion resistance of zinc coating obtained on high-strength grade 10.9 bolts using a new thermal diffusion process. *Materials*. 2019. Vol. 12, Iss. 9. 1400. DOI: 10.3390/ma12091400.
8. Sotskov N. I. Thermal diffusion galvanizing is an effective method of anti-corrosion protection of high-strength fasteners. Control methods. *Chernaya metallurgiya. Byulleten naučno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii*. 2019. Vol. 75. No. 9. pp. 1066–1076. DOI: 10.32339/0135-5910-2019-9-1066-1076.
9. Xiqiang Zhong, Ruijie Liang, Guanghua Liu, Wei Pan. Zinc coating on steel by atmosphere plasma spray and their anti-corrosion behavior. *Materials Letters*. 2022. Vol. 314. 131825. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.131825.
10. Galkin R. V., Chumakov V. I., Naumov V. I. Thermocuring zinc-lamella coating based on epoxy resin. *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 2018. Vol. 26. No. 3. pp. 10–17. DOI: 10.47188/0869-5326_2018_26_3_10.
11. Chuntao Li, Junfeng Wei, Mincong Chen, Xiaoxiao Guan et al. Ultralow-temperature fabrication of chromium-free zinc-aluminum coatings based on polysilazane. *Materials Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 278. 125608. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2021.125608.
12. Bocharov V. A. Protection of metal structures from corrosion by galvanizing. *Gidrotehnika*. 2022. No. 1 (66). pp. 74, 75. DOI: 10.55326/22278400_2022_1_66_74.
13. ГОСТ 9.005–72. Unified system of corrosion and ageing protection. Metals, alloys, metallic and non-metallic coatings. Permissible and impermissible contacts with metals and non-metals. Introduced: 01.07.1973.
14. Pustov Yu. A., Kalitsa V. I., Tursunbaeva A. A. Structural state and corrosion resistance of a plasma coating made of a nickel alloy. *Perspektivnye materialy*. 2018. No. 7. pp. 57–66. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-7-57-66.
15. Kiselev V. G., Medyanii S. A. Basic principles of the influence of a potential jump between two metals on their contact corrosion. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2013. No. 9-10. pp. 89–96.
16. Sotskov N. I., Mentshchikova O. A. Forecasting the service life of galvanized fasteners in water wells. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2020. No. 10. pp. 31–38. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.10.31-38.