

Научная статья

УДК 629.7.023.22

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-54-70

### ТЕРМОДИФФУЗИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

А.В. Князев<sup>1</sup>, С.А. Демин<sup>1</sup>, М.А. Фомина<sup>1</sup>, Е.Н. Батраков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Представлен обзор научных достижений в области применения термодиффузионных покрытий для защиты материалов от агрессивных сред. Диффузионное насыщение позволяет сформировать в поверхностных слоях деталей необходимую фазовую структуру за счет легирования алюминием, хромом или кремнием. Термодиффузионные покрытия могут служить заменой традиционно применяемым покрытиям для защиты от атмосферной коррозии стальных деталей, повышения твердости, износо- и жаростойкости деталей из никелевых сплавов или защиты нержавеющей сталей при воздействии агрессивных кислотных сред.

**Ключевые слова:** конструкционные стали, термодиффузионные покрытия, коррозия, сульфидно-оксидная коррозия, защита от коррозии, антикоррозионные покрытия, диффузия

**Для цитирования:** Князев А.В., Демин С.А., Фомина М.А., Батраков Е.Н. Термодиффузионные покрытия и их применение // Труды ВИАМ. 2024. № 9 (139). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-54-70.

Scientific article

### THERMAL DIFFUSION COATINGS AND THEIR APPLICATIONS

A.V. Knyazev<sup>1</sup>, S.A. Demin<sup>1</sup>, M.A. Fomina<sup>1</sup>, E.N. Batrakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The paper is dedicated to a review of scientific advances in the application of thermal diffusion coatings to protect materials from aggressive environments. Diffusion saturation allows the formation of the desired phase structure in the surface layers of parts by doping with aluminum, boron, chromium, or silicon. Thermal diffusion protective coatings can serve as a replacement for traditionally applied coatings to protect against atmospheric corrosion of steel parts, improve the hardness, wear resistance, and heat resistance of nickel-alloy parts or protect stainless steels from exposure to corrosive media.

**Keywords:** structural steels, thermal diffusion coatings, corrosion, sulfide-oxide corrosion, corrosion protection, anti-corrosion coatings, diffusion

**For citation:** Knyazev A.V., Demin S.A., Fomina M.A., Batrakov E.N. Thermal diffusion coatings and their applications. *Trudy VIAM*, 2024, no. 9 (139), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-54-70.

### Введение

Сталь – это универсальный материал, широко используемый во многих отраслях промышленности. Однако стальные детали могут быть повреждены многочисленными механическими, структурными или химическими факторами, из которых наиболее распространена коррозия [1–3]. С экономической точки зрения 3–5 % валового национального продукта промышленно развитых стран связаны с повреждениями, вызванными коррозией.

Для защиты сталей и сплавов от коррозии используются различные методы и способы защиты, в частности нанесение покрытий [4–15]. Следует отметить покрытия, нанесенные термодиффузионным методом, благодаря простоте нанесения, низкой стоимости компонентов, возможности использования для деталей сложного профиля и высокой прочности связи с материалом подложки [16–20]. Этот метод обычно используется для нанесения окислительных и коррозионностойких покрытий не только на суперсплавы [21–23], но и на простые [24], легированные [24, 25], ферритно-мартенситные [26] и низкоуглеродистые стали [27, 28], сплавы системы Nb–Si–B [29], графит [30], титановые сплавы [31] и др. Данная технология является экологически чистой, поскольку при получении пленки не образуются токсичные пары [32–34].

Принцип термодиффузии (рис. 1) заключается в химическом и структурном насыщении поверхности подложки необходимыми атомами путем осаждения газовой (паровой) фазы во время термообработки, их дальнейшей диффузии в структуру нагретого материала и последующем формировании новых неорганических фаз, образующихся из металла подложки и действующих атомов, и, наконец, диффузии и развитию новых фаз [35–39]. Соответствующие химические реакции происходят в закрытой камере, содержащей порошок с требуемым элементом и деталями. Образующиеся новые фазы обладают необходимыми эксплуатационными свойствами, такими как повышенная химическая стабильность, высокая твердость и др., способствующими износо- и коррозионной стойкости.

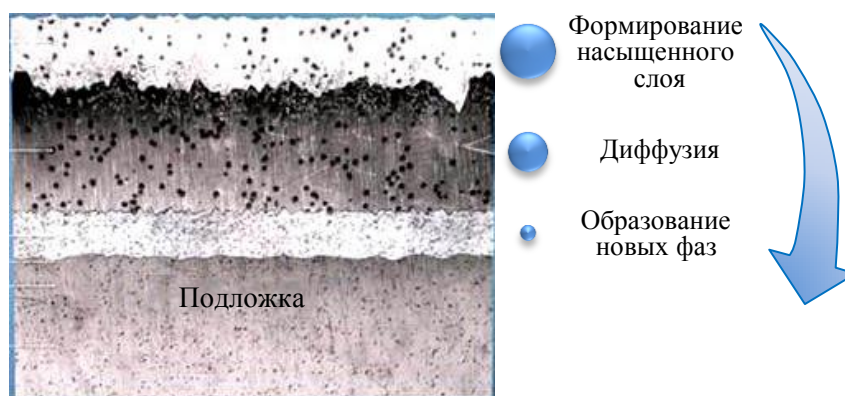


Рис. 1. Схема образования термодиффузионного покрытия

### Защита от атмосферной коррозии

Благодаря антикоррозионным свойствам и невысокой стоимости цинковые покрытия широко используются в качестве защитных покрытий для низколегированных сталей. Наносить защитные цинковые покрытия можно различными методами. Наиболее широко применяется горячее цинкование, разработанное в 1800 г. С 1830 г. данный метод начали активно использовать для защиты стальных деталей, главным образом в автомобилестроении и строительстве. Метод основан на погружении детали в расплав металлического цинка, позволяет

формировать покрытия значительной толщины ( $>150$  мкм) и с высоким уровнем адгезионных свойств за счет образования интерметаллических фаз с различным соотношением железа и цинка. Плавное изменение концентрации цинка в толще покрытия обеспечивает высокую защитную способность.

На рис. 2 представлен результат ускоренных коррозионных испытаний в камере солевого тумана (КСТ) после 2500 ч экспозиции образцов из конструкционной стали Ст.3 с горячим цинковым покрытием толщиной 120 мкм. После экспозиции в КСТ обнаружено наличие белых продуктов коррозии цинкового покрытия, продукты коррозии стали отсутствовали. При горячем цинковании формируются покрытия с незначительной диффузией в стальную подложку вследствие небольшой продолжительности процесса. Защитная способность таких покрытий обусловлена, как правило, большой толщиной. Недостатками метода горячего цинкования являются водородное охрупчивание основного защищаемого материала и потеря цинка, который при взаимодействии с железом оседает на дне ванны.

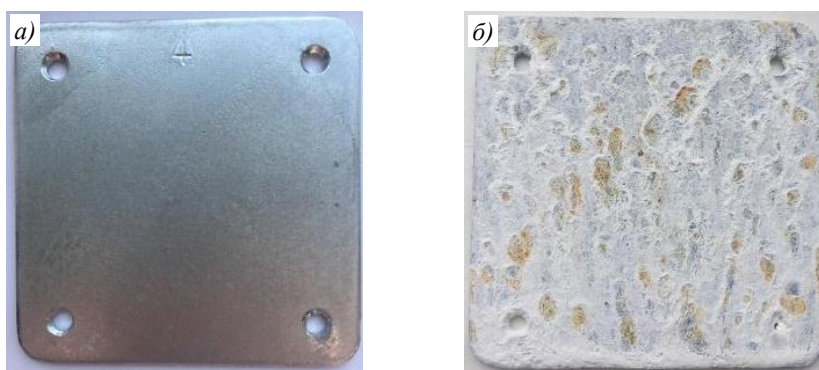


Рис. 2. Результаты коррозионных испытаний стальных образцов с горячим цинковым покрытием толщиной 120 мкм в исходном состоянии (а) и после ускоренных коррозионных испытаний в камере солевого тумана в течение 2500 ч (б)

Следующим этапом в развитии технологии нанесения защитных покрытий является шерардизация. Данный процесс назван в честь Шерарда Осборна Каупера-Коулза, который открыл его в 1900 г., проводя эксперименты по отжигу железа с использованием цинкового порошка в качестве защитного наполнителя. Он обнаружил, что цинк не только покрывает образцы железа, но и образует сплав с железом в ходе диффузии. Поскольку в процессе не используется жидкая фаза, шерардизация стала также известна как сухое или паровое цинкование.

Как и все процессы цинкования, шерардизация обеспечивает жертвенную защиту более благородного основного металла. При контакте с агрессивной средой цинк в диффузионном покрытии предпочтительно пожертвует собой до того, как основной металл начнет растворяться. В нормальных условиях коррозия цинка происходит медленнее, чем коррозия железа. Коррозионные продукты цинка препятствуют коррозии железа [40].

Процесс термодиффузионного цинкования происходит в герметичных стальных контейнерах (ретортах) при температурах от 300 до 500 °С. Предварительно подготовленные сухие образцы погружают в реторты, засыпают цинковую пыль и инертный наполнитель, например песок или оксид алюминия. Возможно добавление галогенидов в смесь порошков в качестве активаторов реакции. В процессе отжига на изделиях образуется последовательность соединений цинка с железом с постепенно уменьшающейся концентрацией цинка, начиная от внешней поверхности и заканчивая

железной подложкой. Слой диффузионного покрытия увеличивается за счет реакции цинка с железом на поверхности стали [40].

Покрытие формируется в три этапа. Начальная стадия (при температуре 193,9 °С) является эндотермической, включает преобразование  $\alpha$ - $\text{NH}_4\text{Cl}$  в  $\beta$ - $\text{NH}_4\text{Cl}$  и разложение  $\text{NH}_4\text{Cl}$  до  $\text{NH}_3$  и  $\text{HCl}$ . Во время второй стадии (при температуре 248,6 °С), которая является экзотермической, образуются соли  $\text{Zn}^{2+}$ , в первую очередь  $\text{ZnCl}_2$ . На последней стадии при температуре 264,1 °С  $\text{Zn}$  осаждается в результате эндотермической реакции на железосодержащую подложку при разложении  $\text{ZnCl}_2$ . Цинк в литом состоянии диффундирует в решетку железа, образуя гамма- ( $\gamma$ - $\text{Fe}_{11}\text{Zn}_{40}$ ) и дельта-фазы ( $\delta$ - $\text{FeZn}_{10}$ ) (рис. 3). Оксид алюминия не участвует в описанном механизме и действует только как наполнитель [41].

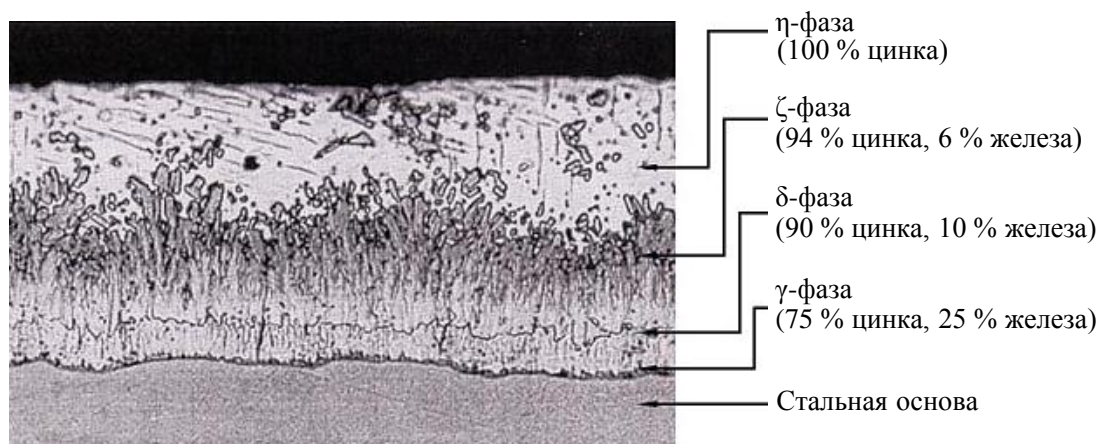


Рис. 3. Схема образования цинкового термодиффузионного покрытия

В процессе термодиффузионного цинкования возможно получение покрытий любой толщины. Кроме того, данная технология позволяет наносить равномерные покрытия на изделия сложной конфигурации. Еще одним достоинством термодиффузионного цинкования является то, что в процессе формирования покрытия не возникает водородное охрупчивание.

Высокая защитная способность термодиффузионного цинкового покрытия подтверждена ускоренными коррозионными испытаниями. На рис. 4 показан внешний вид образцов с гальваническим и термодиффузионным цинковыми покрытиями до и после экспозиции в КСТ.

Согласно результатам ускоренных коррозионных испытаний, после 2000 ч экспозиции в КСТ на гальваническом цинковом покрытии образуются объемные продукты коррозии цинка (белого цвета) и стали (бурого цвета). На образцах с термодиффузионным цинковым покрытием наблюдается потемнение поверхности, что свидетельствует о высокой защитной способности при толщине покрытия  $\leq 15$  мкм.

Наличие диффузионного слоя с градиентным распределением цинка по толщине обеспечивает коррозионную стойкость и твердость формируемых покрытий, что открывает перспективы их применения для защиты от атмосферной коррозии широкого спектра деталей из низколегированных сталей, в том числе имеющих точные размеры.

Основным недостатком шерардизации является продолжительная обработка. Для получения покрытий необходимой толщины от 15 до 30 мкм потребуется от 6 до 12 ч. При понижении температуры продолжительность процесса увеличивается.



Рис. 4. Стальные болты с защитными гальваническими (а, б) и термодиффузионными (в, г) цинковыми покрытиями в исходном состоянии (а, в) и после экспозиции в камере солевого тумана в течение 2000 ч (б, г)

Технология термодиффузионного цинкования с рециркуляцией реактивной атмосферы – это новая технология в цинковании [42]. Процесс проходит в закрытой реторте, в которую загружаются покрываемые образцы вместе с порошковой смесью. Вращательное движение реторты обеспечивает непрерывный контакт порошковой смеси с поверхностями обрабатываемых продуктов. В качестве образцов использовали болты М10 и стержни с резьбой класса прочности 10.9 из закаленной и отпущенной стали 1.7225 (42CrMo<sub>4</sub>). Порошковая смесь состояла из цинкового порошка, 15 % (по массе) ZnO в качестве наполнителя и 3 % (по массе) NH<sub>4</sub>Cl в качестве активатора. При нагреве порошковой смеси в реторте образуются газообразные продукты реакции, которые движутся к покрываемым поверхностям. На стальной подложке происходит адсорбция атомов цинка.

Помимо вращательного движения реторты этому процессу способствует инновационное решение, заключающееся в принудительной циркуляции реактивной атмосферы по цилиндру реторты [43]. Это обеспечивает лучший и более равномерный контакт поверхности продукта с порошковой смесью как на внешней, так и на внутренней поверхности, а также на поверхностях сложной формы. Рециркуляция атмосферы вдоль ретортного цилиндра обеспечивает однородность реактивной атмосферы во всем объеме реторты, что приводит к равномерной температуре в рабочем пространстве, меньшему расходу и более эффективному использованию порошковой смеси по сравнению с обычной шерардизацией [43]. Благодаря рециркуляции и лучшему использованию активных агентов можно создавать слои интерметаллической фазы Fe–Zn [44] на низкоуглеродистой стали за гораздо более короткое время по сравнению с традиционной технологией шерардизации. В то же время покрытия, полученные этим методом, демонстрируют более высокую коррозионную стойкость, чем покрытия, полученные методом горячего погружения [45]. Новая технология представляет собой альтернативу традиционному процессу шерардизации, в которой активатор не используется, а движение смеси в атмосфере определяется исключительно вращательным движением реторты.

Внешний вид покрытия, полученного данным способом на болтах, показан на рис. 5, а [42]. Покрытие не имеет дефектов, матово-серый цвет свидетельствует

о наличии в его структуре интерметаллических фаз Fe–Zn. Кроме того, в поперечном сечении покрытие не имеет разрывов и плотно покрывает поверхность болта на головке (рис. 5, б), конце резьбы (рис. 5, в) и в канавке (рис. 5, з).

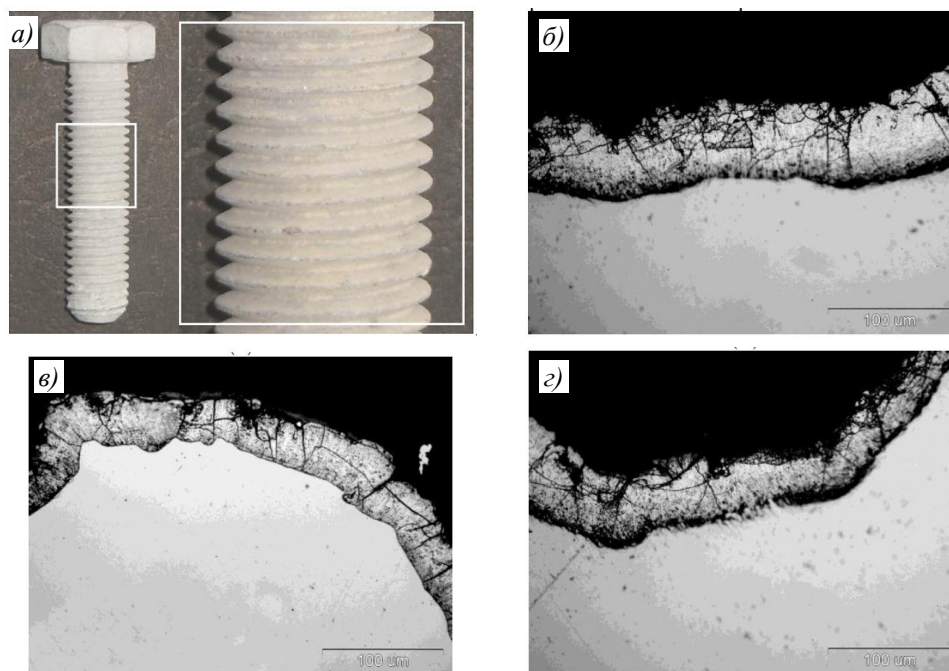


Рис. 5. Внешний вид покрытия (а) и поперечные сечения головки болта (б), конца резьбы (в), углубления (з) [42]

После выдержки в КСТ на термодиффузионном покрытии обнаружены продукты белой ржавчины. После 1000 ч выдержки в КСТ на поверхности становится заметным локальное изменение цвета – появление ржавчины (рис. 6, а). Продукты коррозии белого цвета накапливаются в канавках и обнажают концы резьбы, где интенсивность коррозии явно выше. По завершении испытания коррозия стали не обнаружена, что подтверждено исследованиями структуры покрытия (рис. 6, б). После испытаний покрытие стало неравномерным по толщине, но не потеряло сплошности.

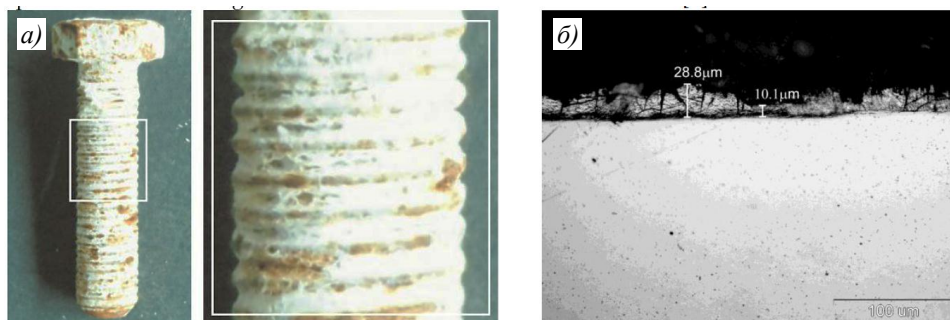


Рис. 6. Внешний вид (а) и структура (б) термодиффузионных цинковых покрытий после коррозионных испытаний в камере солевого тумана в течение 1000 ч [42]

Следует отметить, что исследования не ограничиваются нанесением только цинкового покрытия. В работе [28] описаны результаты совместного термодиффузионного осаждения покрытия на основе Zn–Al на низкоуглеродистую

сталь. Осаждение проводили в тигле из оксида алюминия в смеси порошков при температуре 460 °С в течение 4 ч. Содержание компонентов в порошке для термодиффузионного осаждения покрытий составило, % (по массе) [28]: 50 – Zn, 0/10/20 – Al, 2 – NH<sub>4</sub>Cl, остальное – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

В процессе термодиффузионной обработки образовался богатый цинком слой вследствие преобладающей внутренней диффузии Zn и незначительной диффузии Fe в подложке. По мере продолжения реакции преобладало осаждение Al. Получено однородное покрытие толщиной ~45 мкм, которое может быть разделено на два слоя. Толщина внешнего и внутреннего слоев составляет ~5 и ~40 мкм соответственно (рис. 7). Внешний слой с высоким содержанием Al имел высокую концентрацию Fe с небольшим количеством Zn. Внутренний слой был обогащен Zn и состоял из фаз Fe–Zn.

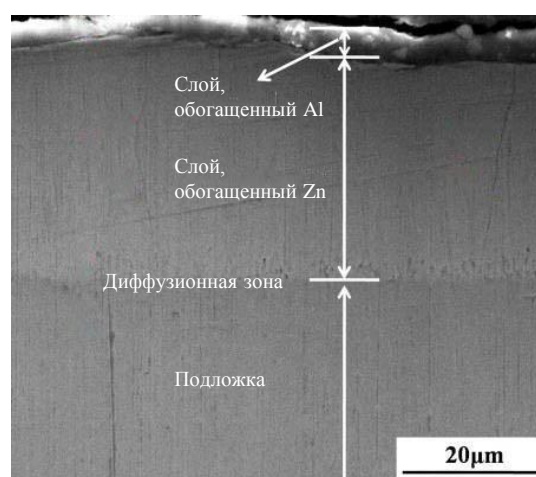


Рис. 7. Микршлиф низкоуглеродистой стали с термодиффузионным покрытием на основе Zn–Al [28]

Коррозионную стойкость покрытий оценили путем измерения потенциодинамических поляризационных кривых в растворе NaCl с концентрацией 3,5 % при температуре 20 °С (рис. 8).

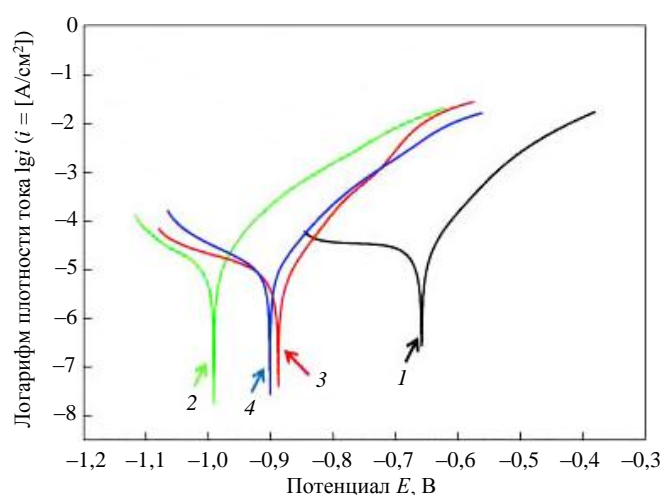


Рис. 8. Потенциодинамические поляризационные кривые образцов подложек без покрытия (1) и с покрытиями на основе Zn (2), Zn–Al с содержанием алюминия 10 (3) и 20 % (4) [28]

Значения потенциала коррозии для покрытий на основе Zn и Zn–Al были значительно ниже, чем у образцов без покрытия. Для покрытий на основе Zn–Al потенциал коррозии более положительный, чем для покрытия на основе Zn, что можно объяснить влиянием Al на структуру покрытий. Однако плотность тока коррозии для покрытия на основе Zn–Al значительно ниже, чем для покрытия на основе Zn. Таким образом, покрытия на основе Zn–Al являются более коррозионностойкими, чем цинковые.

В работе [32] исследовали стойкость к окислению цинковых покрытий из смеси Al и Cr, нанесенных термодиффузионным методом на образцы из низколегированной стали. Подготовленные образцы погружали в смесь порошков, состав которых представлен в таблице, а затем загружали в цилиндрические керамические тигли. На следующем этапе экспериментальной подготовки тигли закрывали керамическими крышками сверху. Герметичные тигли выдерживали в печи ~1 ч при температуре 50 °С, чтобы удалить оставшуюся влагу из насадочной системы. Затем их помещали в трубчатую электропечь, продуваемую аргоном и предварительно нагретую до температуры 400 °С, продолжительность процесса составляла 4 ч.

**Химический состав смеси порошков для термодиффузионного нанесения покрытия [32]**

Покрытие	Содержание компонентов, % (по массе)				
	Zn	Al	Cr	NH <sub>4</sub> Cl	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Zn	50	–	–	2	48
Zn–Al		10	–		38
Zn–Cr		–	10		38

При добавлении Al в смесь порошков все атомы легирующего элемента собираются на поверхности, образуя дополнительный поверхностный слой, который содержит небольшое количество Zn и Fe (рис. 9, а). Слой, который находится в контакте с подложкой, состоит из Zn и Fe. В случае добавления Cr в порошковую смесь поверхностный слой имеет очень маленькую толщину и содержит высокие концентрации Cr и Zn, а также небольшое количество Fe. Средняя толщина внешнего слоя составила 5 мкм, а общая толщина покрытия: 80 мкм (рис. 9, б). Нижний слой покрытия состоит из тех же фаз Fe–Zn, что и покрытия из смеси алюминия.

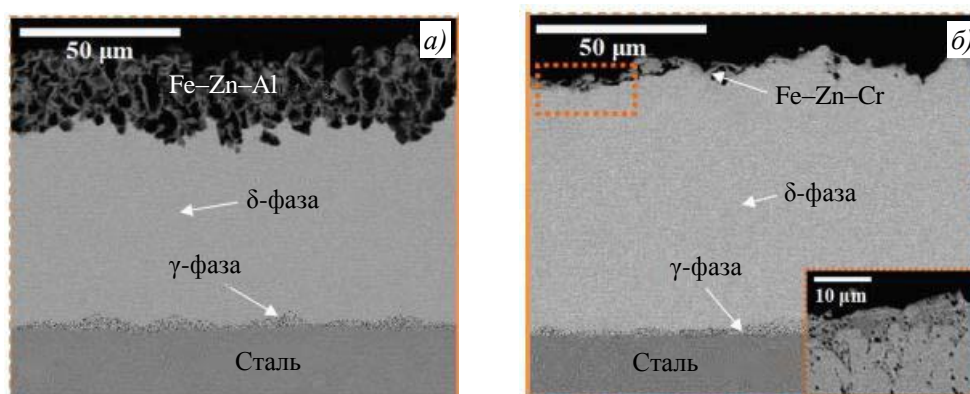


Рис. 9. Микрошлифы низкоуглеродистой стали с термодиффузионным покрытием на основе Zn–Al (а) и Zn–Cr (б) [32]

Результаты испытаний на окисление на воздухе при температуре 400 °С представлены на рис. 10. Покрытия, содержащие легирующие элементы, пострадали от

агрессивной среды незначительно и в основном сохранили первоначальную однородность. Напротив, на простых цинковых покрытиях обнаружены шероховатые окалины, на нескольких участках поверхности – множественные трещины. На образцах стали без покрытия выявлены следы серьезной деградации, вызванной атакой анионов кислорода.

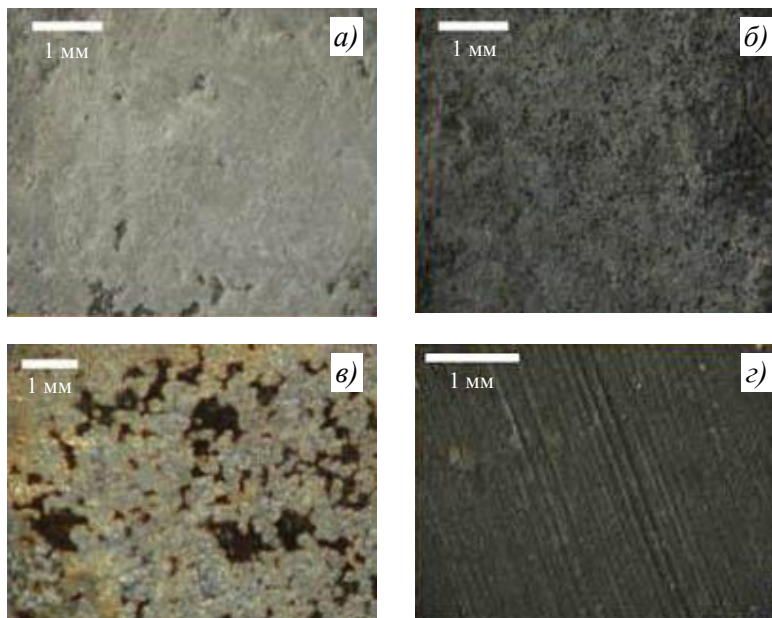


Рис. 10. Внешний вид образцов из низкоуглеродистой стали после испытаний на окисление при температуре 400 °С с покрытиями на основе Zn–Al (а), Zn–Cr (б), Zn (в) и без покрытия (з) [32]

После изотермического окисления в течение 24 ч масса образцов с покрытиями на основе Zn, содержащих соединения Al и Cr, увеличилась в меньшей степени по сравнению с образцами с несмешанными покрытиями на основе Zn и без покрытий, что объясняется образованием окалины. Кроме того, покрытия из цинка, смешанные с хромом, также оказались более стойкими, чем покрытия из смеси алюминия. По-видимому, это связано с тем, что соединения оксида хрома менее подвержены воздействию подобных агрессивных сред.

В работе [46] изучены характеристики термодиффузионного цинкового, цинк-алюминидного, полученного погружением в суспензию, и композитного на основе Zn–Al покрытий. Композитное покрытие на основе Zn–Al формировали на образцах из углеродистой стали в два этапа. На первом этапе наносили термодиффузионное цинковое покрытие из смеси порошка цинка и диоксида кремния при температуре 380 °С в течение 1 ч. Далее образцы с цинковым покрытием погружали в суспензию, имеющую следующий состав, % (по массе): 20 – порошок цинка, 4 – порошок алюминия, 2 – оксид хрома, 10 – полиэтиленгликоль, 1 – метилцеллюлоза, 1 – триэтанолламин, 0,5 – оксид цинка, 61,5 – вода. После погружения в суспензию образцы сушили при температуре 120 °С и нагревали до температуры 300 °С. Для оценки защитной способности покрытий проведены коррозионные испытания в КСТ и натурные испытания в морской среде на глубине 1200 м.

На рис. 11 показаны результаты глубоководных испытаний крепежа с различными покрытиями. Показано, что после погружения глубоко в море в течение 2 лет на крепежных деталях с термодиффузионным цинковым или цинк-алюминидным

покрытиями накапливались красные продукты коррозии. Крепеж с композитным покрытием был в хорошем состоянии. Этот результат также доказывает, что по сравнению с двумя другими покрытиями композитное имеет лучшую коррозионную стойкость.

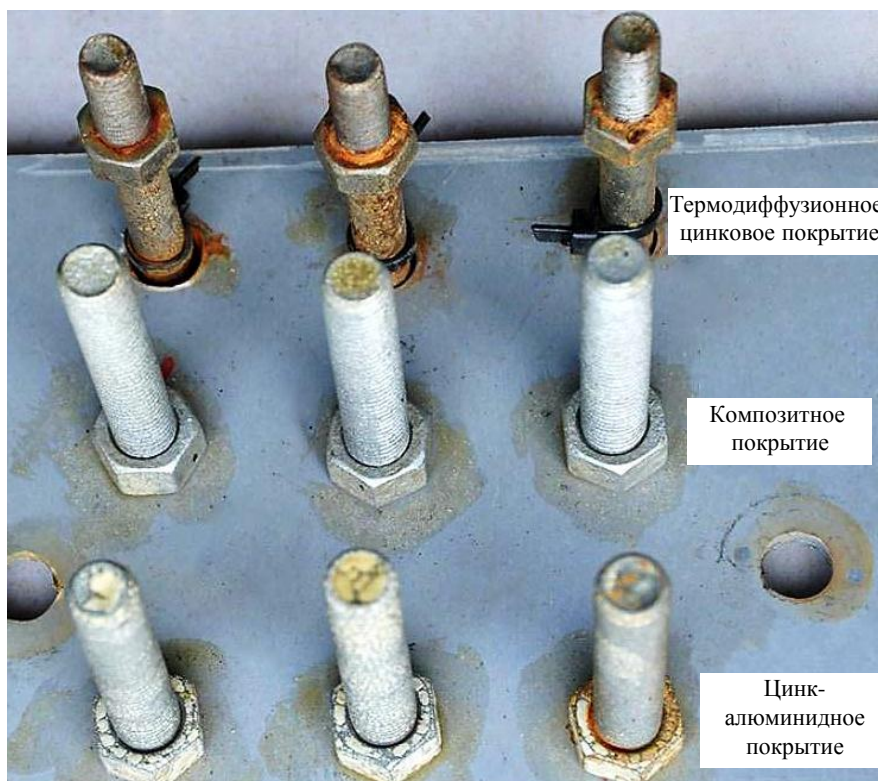


Рис. 11. Внешний вид покрытий после натуральных испытаний в морской среде на глубине 1200 м в течение 2 лет [46]

Электрохимические испытания показали, что композитное покрытие действует как барьер и защитный анод, оберегающий подложку. В частности, композитное покрытие показало превосходную коррозионную стойкость в морской воде. Благодаря этому покрытие подходит для использования в морской среде.

Защитные термодиффузионные покрытия наносятся не только на разные виды стали, но и на магниевые сплавы. Магниевые сплавы используются во многих конструктивных элементах автомобильной, аэрокосмической и военной промышленности. Кроме того, магниевые сплавы (AZ31) становятся все более привлекательными благодаря сочетанию уникальных свойств, таких как низкая плотность, высокая удельная прочность и жесткость. Магний обладает хорошими литейными качествами, обрабатываемостью и легко перерабатывается. На рис. 12 представлена схема этапов формирования термодиффузионного покрытия на магниевых сплавах.

Процесс формирования такого покрытия из порошковой смеси Al-Zn незначительно отличается от традиционного термодиффузионного цинкования. После нагрева до температуры  $\sim 400$  °C элементарные частицы порошка начинают растворяться друг в друге. Однако растворимость элементов при температуре 400 °C различна. Растворимость магния в алюминии (14 % (по массе)) немного выше, чем растворимость алюминия в магнии (10 % (по массе)). На поверхности образца также могут образоваться точки соприкосновения всех трех элементов.

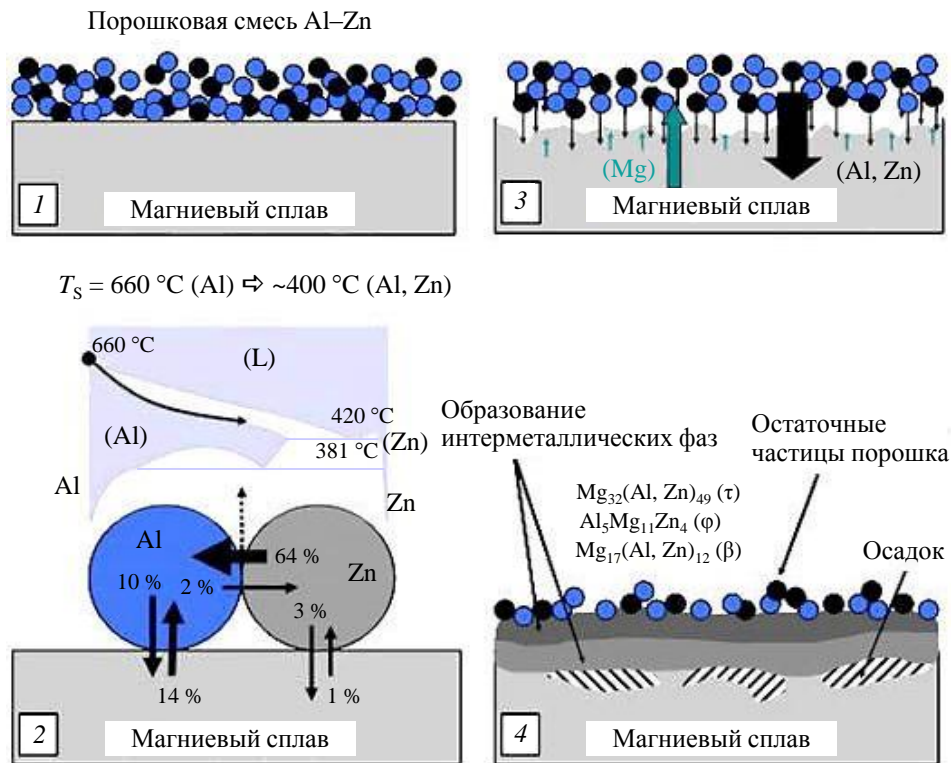


Рис. 12. Этапы формирования термодиффузионного покрытия на магниевом сплаве

Даже при постоянном переносе материала в подложку массовые соотношения элементов превышают пределы растворимости, образуются стабильные фазы. Появляется поверхностно-легированная зона интерметаллических слоев Mg–Al–Zn, которая «растет» внутрь образца. В зависимости от условий она может состоять из отдельных слоев различных интерметаллических соединений. Обогащенные Mg интерметаллические слои формируются около подложки, а слои с высоким содержанием Al/Zn – по направлению к поверхности, обращенной к порошку.

В работе [47] проводили модификацию поверхности магниевое сплава термодиффузионным покрытием Al–Zn. Данная технология использует порошковую смесь алюминия и цинка в качестве источника диффузии и позволяет получить однородные толстые покрытия при температурах  $< 420\text{ }^\circ\text{C}$ . Результаты экспериментов показали, что цинк в порошковой смеси способствует образованию интерметаллических слоев на поверхности магниевое сплава при температурах от  $350$  до  $413\text{ }^\circ\text{C}$ . Добавление Zn в диффузионный порошок обеспечивает образование поверхностных легированных слоев во время термодиффузионной обработки сплавов из магния. Легированные слои толщиной от  $70$  до  $600\text{ мкм}$  можно получить при температуре  $350\text{ }^\circ\text{C}$ . Во время термодиффузионного процесса Zn действует как катализатор, активирующий диффузию Al в подложку из сплава Mg за счет снижения температуры плавления диффузионного порошка.

Чтобы охарактеризовать коррозионные свойства легированного покрытия, образцы с покрытием и без него погружали в раствор NaCl с концентрацией  $5\%$  (по массе) при комнатной температуре (рис. 13).

После погружения в течение  $2\text{ ч}$  на поверхности образца без покрытия наблюдали значительное количество продуктов коррозии. Первая небольшая локальная питтинговая коррозия на поверхности образца с покрытием появилась после погружения в течение  $30\text{ ч}$ . Продолжительная выдержка ( $140\text{ ч}$ ) привела к сильной коррозии с глубокими точечными образованиями по всей поверхности и массовому появлению продуктов

коррозии на образце без покрытия. Эти результаты показывают, что поверхностные легированные слои имеют значительно более высокую коррозионную стойкость по сравнению с литой подложкой.

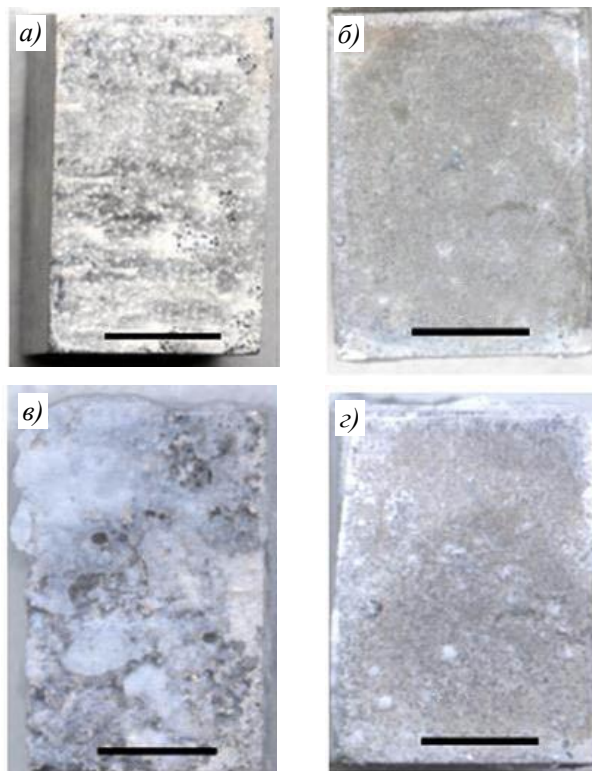


Рис. 13. Внешний вид образцов без покрытия (а, в) и с покрытием (б, г) после погружения в раствор NaCl с концентрацией 5 % (по массе) при комнатной температуре в течение 2 (а), 30 (б) и 140 ч (в, г)

### Заключения

Диффузионное насыщение металлических деталей позволяет сформировать в поверхностных слоях изделий необходимую фазовую структуру для повышения жаро- и износостойкости, а также стойкости к сульфидно-оксидной коррозии. Одним из основных преимуществ диффузионных покрытий является образование прочной связи наносимого элемента с защищаемым металлом вследствие взаимной диффузии. Постепенное изменение толщины наносимого покрытия обеспечивает хорошее сцепление с металлической основой в результате плавного или ступенчатого изменения коэффициентов термического расширения и, как следствие, долговечность эксплуатации деталей при резких колебаниях температуры.

Однородность реактивной атмосферы по всему объему рабочего пространства достигается за счет рециркуляции атмосферы. Такой подход позволяет более эффективно использовать порошковую смесь и получить покрытия толщиной 50–72 мкм при продолжительности выдержки 120–240 мин при температуре 440 °С.

Введение алюминия и хрома в порошок цинка повышает коррозионные и окислительные характеристики покрытий вследствие образования поверхностной защитной окалины.

Термодиффузионные покрытия можно использовать не только для сталей, но и для сплавов, в частности магниевых. При термодиффузионном осаждении покрытий на основе Zn–Al на магниевые сплавы Zn действует как катализатор, активирующий диффузию Al в подложку, тем самым позволяя снизить температуру процесса осаждения.

Свойства термодиффузионного цинкового покрытия обеспечивают сохранение прочностных характеристик болтов с классом прочности 10.9. При нанесении термодиффузионных покрытий на крепежные изделия предел прочности при разрыве уменьшается, но не ниже требуемого уровня. На предел текучести данное покрытие не влияет. Однако отсутствуют данные по такому важному показателю, как свинчиваемость.

В результате анализа научно-технической литературы за пятнадцатилетнюю ретроспективу информация о возможности использования альтернативных сплавов цинка для обеспечения более высокой диффузии в сталь или другие металлические материалы не найдена.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5–6. С. 40–44.
2. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
3. Каблов Е.Н., Хмелева К.М., Заварзин С.В., Козлов И.А., Лонский С.Л. Влияние термической обработки на характеристики алюмоцинковых покрытий, полученных методом ХГН // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-78-91.
4. Жабин А.Н., Няфкин А.Н., Серпова В.М., Краснов Е.И. Методы физического осаждения из газовой фазы для изготовления металлических композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 11 (93). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-68-75.
5. Каблов Е.Н., Акинина М.В., Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Леонов А.А. Исследование особенностей фазового состава и тонкой структуры литейного магниевых сплава МЛ19 в литом и термообработанном состояниях // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
6. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
7. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
8. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
9. Wang P., He W., Mauer G. et al. Monte Carlo simulation of column growth in plasma spray physical vapor deposition process // Surface and Coatings Technology. 2018. Vol. 335. P. 188–197.
10. Öchsner A., Murch G.E., Delgado J.M.P.Q. Microstructure and properties of CBN diffusion coating on high-speed steel // Defect and Diffusion Forum. 2011. Vol. 312–315. P. 542–547.
11. Zhang H., Pan Y., He Y.Z. Grain refinement and boundary misorientation transition by annealing in the laser rapid solidified 6FeNiCoCrAlTiSi multicomponent ferrous alloy coating // Surface and Coatings Technology. 2011. Vol. 205 P. 4068–4072.
12. Qi K., Yang Y., Hu G.F. et al. Thermal expansion control of composite coatings on 42CrMo by laser cladding // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 397. P. 125983.
13. Kuo Y.L., Chang K.H. Atmospheric pressure plasma enhanced chemical vapor deposition of SiO<sub>x</sub> films for improved corrosion resistant properties of AZ31 magnesium alloys // Surface and Coatings Technology. 2015. Vol. 283. P. 194–200.
14. García J.R., Fernández J.E., Cuetos J.M., Costales F.G. Fatigue effect of WC coatings thermal sprayed by HVOF and laser treated, on medium carbon steel // Engineering Failure Analysis. 2011. Vol. 18. P. 1750–1760.

15. Yu O., Goncharov I.V., Sapagina R.R. et al. Tantalum chemical vapour deposition on steel and tungsten substrates in the TaBr<sub>5</sub>-cd-He system // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 377. P. 124893.
16. Wang W., Wang D., Han F.S. Improvement of corrosion resistance of twinning-induced plasticity steel by hot-dipping aluminum with subsequent thermal diffusion treatment // *Materials Letters*. 2019. Vol. 248. P. 60–64.
17. Kurt B., Özdoğan L., Güney B. et al. Characterization and wear behavior of TiBC coatings formed by thermo-reactive diffusion technique on AISI D6 steel // *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 385. P. 125332.
18. Fan X.S., Yang Z.G., Xia Z.X. et al. The microstructure evolution of VC coatings on AISI H13 and 9Cr18 steel by thermo-reactive deposition process // *Journal of Alloys and Compounds*. 2010. Vol. 505. P. L15–L18.
19. Kong D.J., Wang J.C., Guo H.Y. XPS and EDS analysis of VC coatings prepared by TD process // *Rare Metal Materials and Engineering*. 2016. Vol. 45. P. 297–302.
20. Sun C.Y., Xue Q., Zhang J. et al. Growth behavior and mechanical properties of Cr–V composite surface layer on AISI D3 steel by thermal reactive deposition // *Vacuum*. 2018. Vol. 148. P. 158–167.
21. Tong L., Dengzun Y., Chungen Z. Low-temperature formation of aluminide coatings on Ni-base superalloys by pack cementation process // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2010. Vol. 23. P. 381–385.
22. Qiao M., Zhou C. Hot corrosion behavior of Co modified NiAl coating on nickel base superalloys // *Corrosion Science*. 2012. Vol. 63. P. 239–245.
23. He H., Liu Z., Wang W., Zhou C. Microstructure and hot corrosion behavior of Co–Si modified aluminide coating on nickel based superalloys // *Corrosion Science*. 2015. Vol. 100. P. 466–473.
24. Mohammadi K., Hagi A.K. A study on characterization of pack-cemented aluminide coating on metals // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 201. P. 669–672.
25. Xiang Z.D., Datta P.K. Relationship between pack chemistry and aluminide coating formation for low-temperature aluminisation of alloy steels // *Acta Materialia*. 2006. Vol. 54. P. 4453–4463.
26. Fähsing D., Oskay C., Meibner T.M., Galetz M.C. Corrosion testing of diffusion-coated steel in molten salt for concentrated solar power tower systems // *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 354. P. 46–55.
27. Vourlias G., Pistofidis N., Chaliampalias D. et al. Zinc deposition with pack cementation on low carbon steel substrates // *Journal of Alloys and Compounds*. 2006. Vol. 416. P. 125–130.
28. Xue Q., Sun C., Yu J.Y. et al. Microstructure evolution of a Zn–Al coating co-deposited on low-carbon steel by pack cementation // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 699. P. 1012–1021.
29. Cheng J., Yi S., Park J.S. Simultaneous coating of Si and B on Nb–Si–B alloys by a halide activated pack cementation method and oxidation behaviors of the alloys with coatings at 1100 °C // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 644. P. 975–981.
30. Pourasad J., Ehsani N. In-situ synthesis of SiC–ZrB<sub>2</sub> coating by a novel pack cementation technique to protect graphite against oxidation // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 690. P. 692–698.
31. Zhao Y.G., Zhou W., Qin Q.D. et al. Effect of pre-oxidation on the properties of aluminide coating layers formed on Ti alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2005. Vol. 391. P. 136–140.
32. Chaliampalias D., Papazoglou M., Tsipas S. et al. The effect of Al and Cr additions on pack cementation zinc coatings // *Applied Surface Science*. 2010. Vol. 256. P. 3618–3623.
33. Qiao Y.Q., Guo X.P. Formation of Cr-modified silicide coatings on a Ti–Nb–Si based ultrahigh-temperature alloy by pack cementation process // *Applied Surface Science*. 2010. Vol. 256. P. 7462–7471.
34. Stathokostopoulos D., Chaliampalias D., Stefanaki E.C. et al. Structure, morphology and electrical properties of Mg<sub>2</sub>Si layers deposited by pack cementation // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 285. P. 417–424.
35. *Thermochemical Surface Engineering of Steels* / eds. E.J. Mittemeijer, M.A.J. Somers. Cambridge: Elsevier, Woodhead Publishing, 2014. 792 p.
36. *Handbook of Hard Coatings: Deposition Technologies, Properties and Applications* / ed. R.F. Bunshah. New York: Noyes Publ., Park Ridge, 2001. 560 p.

37. Budinski K.G. Overview of Surface Engineering and Wear. Ohio: ASTM International Publishing, 1996. 21 p.
38. Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics / ed. J.R. Davis. Ohio: ASM International, 2002. 364 p.
39. Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance / ed. J.R. Davis. Ohio: ASM International, 2001. 288 p.
40. Natrup F., Graf W. Sherardizing: corrosion protection of steels by zinc diffusion coatings // Thermochemical Surface Engineering of Steels. Copenhagen: DTU Library, 2015. P. 737–750.
41. Pistofidis N., Vourlias G., Chaliampalias D. et al. On the mechanism of formation of zinc pack coatings // Journal of Alloys and Compounds. 2006. Vol. 407. P. 221–225.
42. 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. P. 1400.
43. Kania H., Sipa J. Thermal diffusion zinc coating technology with reactive atmosphere recirculation. Part 1: General description of technology and structure of coatings // Ochrona Przed Korozja. 2018. Vol. 11. P. 338–345.
44. Kania H., Sipa J. Zinc coating deposition with new thermal diffusion process on low carbon steel substrates // Wiadomosci Hutnicze. 2019. Vol. 1. P. 2–8.
45. Kania H., Sipa J., Skupińska A. Thermal diffusion zinc coating technology with reactive atmosphere recirculation. Part 2: Corrosion resistance of coatings // Ochrona Przed Korozja. 2018. Vol. 12. P. 375–382.
46. Lin Z., Xu L., Li X. et al. Corrosion resistance of composite coating used for fastener protection // Anti-Corrosion Methods and Materials. 2019. Vol. 66. P. 595–602.
47. Schubert E., Klassen M., Zerner I. et al. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry // Journal of Materials Processing Technology. 2001. Vol. 115. P. 2–8.

#### References

1. Kablov E.N. Marketing of materials science, aircraft engineering and industry: present and future. *Direktor po marketingu i sbytu*, 2017, no. 5–6, pp. 40–44.
2. Kablov E.N., Startsev V.O. Measurement and forecasting of materials samples' temperature during weathering in different climatic zones. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
3. Kablov E.N., Khmeleva K.M., Zavarzin S.V., Kozlov I.A., Lonskii S.L. The effect of heat treatment on the characteristics of aluminium-zinc coatings obtained by the cold spray method. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 05, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-78-91.
4. Zhabin A.N., Nyafkin A.N., Serpova V.M., Krasnov E.I. Methods of physical vapor deposition for the manufacture of metal matrix composites (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 11 (93), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 05, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-68-75.
5. Kablov E.N., Akinina M.V., Volkova E.F., Mostyaev I.V., Leonov A.A. The research of aspects of phase composition and fine structure of magnesium alloy ML9 in the as-cast and heat-treated conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
6. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
7. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
8. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aviation equipment. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 82, no. 6, pp. 520–530.
9. Wang P., He W., Mauer G. et al. Monte Carlo simulation of column growth in plasma spray physical vapor deposition process. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 335, pp. 188–197.

10. Öchsner A., Murch G.E., Delgado J.M.P.Q. Microstructure and properties of CBN diffusion coating on high-speed steel. *Defect and Diffusion Forum*, 2011, vol. 312–315, pp. 542–547.
11. Zhang H., Pan Y., He Y.Z. Grain refinement and boundary misorientation transition by annealing in the laser rapid solidified 6FeNiCoCrAlTiSi multicomponent ferrous alloy coating. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 205, pp. 4068–4072.
12. Qi K., Yang Y., Hu G.F. et al. Thermal expansion control of composite coatings on 42CrMo by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 397, p. 125983.
13. Kuo Y.L., Chang K.H. Atmospheric pressure plasma enhanced chemical vapor deposition of SiO<sub>x</sub> films for improved corrosion resistant properties of AZ31 magnesium alloys. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 283, pp. 194–200.
14. García J.R., Fernández J.E., Cuetos J.M., Costales F.G. Fatigue effect of WC coatings thermal sprayed by HVOF and laser treated, on medium carbon steel. *Engineering Failure Analysis*, 2011, vol. 18, pp. 1750–1760.
15. Yu O., Goncharov I.V., Sapagina R.R. et al. Tantalum chemical vapour deposition on steel and tungsten substrates in the TaBr<sub>5</sub>-cd-He system. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 377, p. 124893.
16. Wang W., Wang D., Han F.S. Improvement of corrosion resistance of twinning-induced plasticity steel by hot-dipping aluminum with subsequent thermal diffusion treatment. *Materials Letters*, 2019, vol. 248, pp. 60–64.
17. Kurt B., Özdoğan L., Güney B. et al. Characterization and wear behavior of TiBC coatings formed by thermo-reactive diffusion technique on AISI D6 steel. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 385, p. 125332.
18. Fan X.S., Yang Z.G., Xia Z.X. et al. The microstructure evolution of VC coatings on AISI H13 and 9Cr18 steel by thermo-reactive deposition process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 505, pp. L15–L18.
19. Kong D.J., Wang J.C., Guo H.Y. XPS and EDS analysis of VC coatings prepared by TD process. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, vol. 45, pp. 297–302.
20. Sun C.Y., Xue Q., Zhang J. et al. Growth behavior and mechanical properties of Cr–V composite surface layer on AISI D3 steel by thermal reactive deposition. *Vacuum*, 2018, vol. 148, pp. 158–167.
21. Tong L., Dengzun Y., Chungun Z. Low-temperature formation of aluminide coatings on Ni-base superalloys by pack cementation process. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2010, vol. 23, pp. 381–385.
22. Qiao M., Zhou C. Hot corrosion behavior of Co modified NiAl coating on nickel base superalloys. *Corrosion Science*, 2012, vol. 63, pp. 239–245.
23. He H., Liu Z., Wang W., Zhou C. Microstructure and hot corrosion behavior of Co–Si modified aluminide coating on nickel based superalloys. *Corrosion Science*, 2015, vol. 100, pp. 466–473.
24. Mohammadi K., Haghi A.K. A study on characterization of pack-cemented aluminide coating on metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 201, pp. 669–672.
25. Xiang Z.D., Datta P.K. Relationship between pack chemistry and aluminide coating formation for low-temperature aluminisation of alloy steels. *Acta Materialia*, 2006, vol. 54, pp. 4453–4463.
26. Fähsing D., Oskay C., Meibner T.M., Galetz M.C. Corrosion testing of diffusion-coated steel in molten salt for concentrated solar power tower systems. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 354, pp. 46–55.
27. Vourlias G., Pistofidis N., Chaliampalias D. et al. Zinc deposition with pack cementation on low carbon steel substrates. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, vol. 416, pp. 125–130.
28. Xue Q., Sun C., Yu J.Y. et al. Microstructure evolution of a Zn–Al coating co-deposited on low-carbon steel by pack cementation. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 699, pp. 1012–1021.
29. Cheng J., Yi S., Park J.S. Simultaneous coating of Si and B on Nb–Si–B alloys by a halide activated pack cementation method and oxidation behaviors of the alloys with coatings at 1100 °C. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 644, pp. 975–981.
30. Pourasad J., Ehsani N. In-situ synthesis of SiC–ZrB<sub>2</sub> coating by a novel pack cementation technique to protect graphite against oxidation. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 690, pp. 692–698.
31. Zhao Y.G., Zhou W., Qin Q.D. et al. Effect of pre-oxidation on the properties of aluminide coating layers formed on Ti alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2005, vol. 391, pp. 136–140.

32. Chaliampalias D., Papazoglou M., Tsipas S. et al. The effect of Al and Cr additions on pack cementation zinc coatings. *Applied Surface Science*, 2010, vol. 256, pp. 3618–3623.
33. Qiao Y.Q., Guo X.P. Formation of Cr-modified silicide coatings on a Ti–Nb–Si based ultrahigh-temperature alloy by pack cementation process. *Applied Surface Science*, 2010, vol. 256, pp. 7462–7471.
34. Stathokostopoulos D., Chaliampalias D., Stefanaki E.C. et al. Structure, morphology and electrical properties of Mg<sub>2</sub>Si layers deposited by pack cementation. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 285, pp. 417–424.
35. *Thermochemical Surface Engineering of Steels*. Eds. E.J. Mittemeijer, M.A.J. Somers. Cambridge: Elsevier, Woodhead Publishing, 2014, 792 p.
36. *Handbook of Hard Coatings: Deposition Technologies, Properties and Applications*. Ed. R.F. Bunshah. New York: Noyes Publ., Park Ridge, 2001, 560 p.
37. Budinski K.G. *Overview of Surface Engineering and Wear*. Ohio: ASTM International Publishing, 1996, 21 p.
38. *Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics*. Ed. J.R. Davis. Ohio: ASM International, 2002, 364 p.
39. *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*. Ed. J.R. Davis. Ohio: ASM International, 2001, 288 p.
40. Natrup F., Graf W. Sherardizing: corrosion protection of steels by zinc diffusion coatings. *Thermochemical Surface Engineering of Steels*. Copenhagen: DTU Library, 2015, pp. 737–750.
41. Pistofidis N., Vourlias G., Chaliampalias D. et al. On the mechanism of formation of zinc pack coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, vol. 407, pp. 221–225.
42. 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, p. 1400.
43. Kania H., Sipa J. Thermal diffusion zinc coating technology with reactive atmosphere recirculation. Part 1: General description of technology and structure of coatings. *Ochrona Przed Korozja*, 2018, vol. 11, pp. 338–345.
44. Kania H., Sipa J. Zinc coating deposition with new thermal diffusion process on low carbon steel substrates. *Wiadomosci Hutnicze*, 2019, vol. 1, pp. 2–8.
45. Kania H., Sipa J., Skupińska A. Thermal diffusion zinc coating technology with reactive atmosphere recirculation. Part 2: Corrosion resistance of coatings. *Ochrona Przed Korozja*, 2018, vol. 12, pp. 375–382.
46. Lin Z., Xu L., Li X. et al. Corrosion resistance of composite coating used for fastener protection. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2019, vol. 66, pp. 595–602.
47. Schubert E., Klassen M., Zerner I. et al. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, vol. 115, pp. 2–8.

**Информация об авторах**

**Князев Андрей Вадимович**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Демин Семен Анатольевич**, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Фомина Марина Александровна**, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Батраков Евгений Николаевич**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Information about the authors**

**Andrey V. Knyazev**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Semen A. Demin**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Marina A. Fomina**, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Evgeniy N. Batrakov**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru