



УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-3-3

**КОРРОЗИОННОСТОЙКОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ
ДЕТАЛЕЙ ГТД ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАРТЕНСИТОСТАРЕЮЩИХ
СТАЛЕЙ НА РАБОЧИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДО 450°С**

А.Г. Галоян

кандидат технических наук

С.А. Мубояджян

доктор технических наук

Л.П. Егорова

Е.Е. Булавинцева

Июнь 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-3-3

А.Г. Галоян¹, С.А. Мубояджян¹, Л.П. Егорова¹, Е.Е. Булавинцева¹

**КОРРОЗИОННОСТОЙКОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДЕТАЛЕЙ
ГТД ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАРТЕНСИТОСТАРЕЮЩИХ СТАЛЕЙ
НА РАБОЧИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДО 450°С**

Приведены результаты исследований по разработке коррозионностойкого покрытия и технологии его нанесения на образцы из высокопрочной стали ВКС-170. Представлены результаты испытаний на коррозионную стойкость, жаростойкость, длительную прочность, многоцикловую усталость, а также результаты металлографического и металлофизического исследования образцов после испытаний.

Ключевые слова: *высокопрочные стали, коррозионностойкое покрытие, шликерная технология, солевая коррозия, жаростойкость.*

A.G. Galoyan, S.A. Muboyadzyan, L.P. Egorova, E.E. Bulavintseva

**CORROSION-RESISTANT COATING FOR PROTECTION OF GTE DETAILS
MADE OF HIGH-STRENGTH MARAGING CONSTRUCTIONAL STEEL WITH
OPERATING TEMPERATURE UP TO 450°C**

This article provides results of developing corrosion-resistant coating and application technology for protecting GTE details made of high-strength maraging constructional steel VKS-170 from salt corrosion at up to 450°C. Results of corrosion-resistance, heat-resistance, creep rupture strength and high-cycle fatigue tests, as well as metallographic analysis of specimens after testing are provided.

Keywords: *high-strength steel, corrosion-resistance, corrosion-resistant coating, slurry coating, salt corrosion, heat-resistance.*

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

В настоящее время для высокоресурсных ГТД существует проблема защиты валов двигателя из высокопрочных сталей от солевой коррозии, являющейся причиной снижения усталостной прочности и ограничения ресурса валов [1–4].

За рубежом в области технологии нанесения и состава коррозионностойких покрытий основными разработчиками являются фирмы General Electric, United Technologies, Rolls-Royce, Sulzer Metco, Xiaoci Zheng. Основные разработки в данной области связаны с созданием покрытий на основе никеля, алюминия, кобальта, обеспечивающих высокие антикоррозионные свойства, а также покрытия с внешним керамическим слоем [5–8].

Основными технологиями получения таких покрытий являются процессы на основе высокоскоростного и атмосферного плазменного напыления, физическое и химическое осаждение из паровой или газовой фазы, позволяющие покрывать крупногабаритные детали двигателя [9–12]. Недостатком указанных методов является то, что температура формирования коррозионностойкого покрытия (~600–1000°C) выше температуры упрочнения стали ВКС-170 (~500°C), а при нагреве стали выше указанной температуры происходит ее разупрочнение.

Лучшим отечественным аналогом для защиты от солевой коррозии стальных лопаток компрессора является разработанное в ВИАМ коррозионностойкое ионно-плазменное покрытие типа СДП-1+ВСДП-20 [13–20]. Однако существующее ионно-плазменное оборудование (установки МАП-1М, МАП-2 и МАП-3) не позволяет покрывать крупногабаритные детали типа валов ГТД. Создание и освоение в промышленности нового типа ионно-плазменного оборудования, позволяющего наносить покрытия на крупногабаритные детали ГТД требует больших материальных затрат и времени. Поскольку дорогостоящие крупногабаритные детали ГТД изготавливают в ограниченном количестве – по числу выпускаемых ГТД, с экономической точки зрения целесообразнее разработать новую технологию нанесения коррозионностойких покрытий, в которой используется существующее в серийном производстве технологическое оборудование, например технологию шликерных покрытий [21, 22].

Методика проведения экспериментов

Нанесение шликерного покрытия на поверхность образцов проводили при помощи краскораспылителя с диаметром дюзы $1 \pm 0,1$ мм и давлении сжатого воздуха, подаваемого в систему краскораспылителя, 0,19–2,1 МПа. Формирование шликерного покрытия осуществляли в камерных электропечах сопротивления в воздушной атмосфере при температуре от 100 до 350°C.

В качестве шликера использовали водный раствор неорганического алюмохром-фосфатного связующего (АХФ) с различными наполнителями следующих составов: АХФ+Al, АХФ+Al+Si, АХФ+Al+Cr, АХФ+Al+AlSi, АХФ+Al+TiAl, АХФ+Al+Cr+Si, АХФ+Al+ZrO₂. Шликерные покрытия опытных составов наносили толщиной от 30 до 50 мкм. В качестве наполнителей использовали мелкодисперсные порошки Al, Cr, Si, AlSi, TiAl, ZrO₂, получаемые путем помола, сушки и просева.

Для исследования процессов формирования коррозионностойких шликерных покрытий на поверхности образцов из высокопрочной конструкционной стали ВКС-170 при проведении ускоренных циклических коррозионных испытаний (УЦКИ) и испытаний на жаростойкость использовали диски из стали ВКС-170 диаметром 15–20 мм и толщиной 2–4 мм.

Для проведения испытаний на общую коррозионную стойкость в камере солевого тумана и в условиях промышленной атмосферы умеренного климата использовали пластины прямоугольной формы из стали ВКС-170 размером 100×50×2,5 мм.

Для определения длительной жаропрочности, усталостной прочности образцов из стали ВКС-170 с шликерными покрытиями использовали стандартные образцы.

Предварительная подготовка поверхности образцов включала операции по обезжириванию поверхности, последующую обдувку поверхности образцов сухим электрокорундом фракцией 50–100 мкм и промывку в ультразвуковой ванне для удаления остатков электрокорунда.

Для подготовки порошковых смесей, необходимых для процессов формирования покрытия, использовали стандартное оборудование: шкаф вытяжной, барабан-смеситель, барабан для размола компонентов смеси, сушильный шкаф и др.

Испытания композиций «сталь ВКС-170–шликерное покрытие» проводились в соответствии со следующей технической документацией:

- РТМ 1.2.189–2006 (ВИАМ) – ускоренные циклические коррозионные испытания (УЦКИ);
- ГОСТ 9.308–85 – общая коррозионная стойкость в камере солевого тумана (КСТ-35);
- ГОСТ 9.909–86 – общая коррозионная стойкость в условиях промышленной атмосферы умеренного климата;
- ГОСТ 6130–71 – оценка жаростойкости;
- ГОСТ 10145 – определение характеристик длительной прочности;
- ГОСТ 25.502 – испытания на выносливость.

Исследования покрытий проводились с использованием металлографических микроскопов «Versamet-2» и GX-51 фирмы Olympus.

Анализ структуры проводился на растровом электронном микроскопе JSM-840 в соответствии с РТМ 1.2А-096–2000.

Результаты исследований и их обсуждение

Шликер изготавливали путем смешивания в определенных пропорциях водного раствора АХФ с мелкодисперсными (<10 мкм) порошками Al, Cr, Si, AlSi, TiAl, ZrO₂. Готовый шликер наносили на предварительно подготовленную поверхность образцов из стали ВКС-170 при помощи краскораспылителя. После нанесения шликера образцы подсушивали на воздухе, а затем закладывали в печь, где при температуре 350°С в течение 0,5–1 ч окончательно формируется шликерное покрытие.

Для оценки защитных свойств покрытий, а также для выбора покрытия, обеспечивающего максимальный защитный эффект, по методике ВИАМ проведены 10 циклов ускоренных циклических испытаний на коррозионную стойкость (УЦКИ) при температуре 450°С образцов из стали ВКС-170 с нанесенными шликерным способом экспериментальными композициями коррозионностойких покрытий составов: АХФ+Al, АХФ+Al+Si, АХФ+Al+Cr, АХФ+Al+AlSi, АХФ+Al+TiAl, АХФ+Al+Cr+Si, АХФ+Al+ZrO₂.

При проведении УЦКИ образцы из стали ВКС-170 с нанесенными шликерным способом экспериментальными композициями коррозионностойких покрытий помещали в печь, предварительно нагретую до 450°С, и выдерживали при этой температуре в течение 1 ч, после чего образцы выгружали из печи и после подстуживания в течение 1–2 мин на воздухе охлаждали до комнатной температуры в водном растворе 3%-ного хлористого натрия. После этого образцы помещали во влажную камеру на 22 ч при комнатной температуре (ГОСТ 9.308).

Анализ состояния покрытия проводили после каждого цикла испытаний визуально для обнаружения коррозионных повреждений на поверхности образцов. После завершения 10 циклов испытаний рассчитывали процент площади поверхности образцов, подверженной коррозии. Результаты испытаний образцов из стали ВКС-170 приведены в табл. 1.

На образцах из стали ВКС-170 с шликерными покрытиями лучшую коррозионную защиту обеспечили составы АХФ+Al+Si, АХФ+Al+Cr, АХФ+Al+Cr+Si.

На рис. 1 представлен внешний вид образцов из стали ВКС-170 без покрытия и с шликерными покрытиями после 10 циклов ускоренных циклических коррозионных испытаний (УЦКИ) при температуре 450°С.

Металлографические исследования образцов из стали ВКС-170 после 10 циклов УЦКИ показали, что на поверхности образцов без покрытия образовались коррозионные язвы (рис. 2, а). На образцах с шликерными покрытиями составов АХФ+Al+Si, АХФ+Al+Cr, АХФ+Al+Cr+Si под покрытием следов коррозии не наблюдается (рис. 2, б-г).

Таблица 1

Результаты испытаний образцов из стали ВКС-170 без покрытия и с шликерными покрытиями на коррозионную стойкость при 450°C

Тип покрытия	Удельное изменение массы образцов, г/м ² , после циклов		Примечание
	1	10	
Без покрытия	4,6	38,0	Коррозионные язвы на поверхности
АХФ+Al	3,4	8,0	Коррозионные разводы на поверхности
АХФ+Al+AlSi	3,2	7,6	
АХФ+Al+TiAl	4,8	9,0	
АХФ+Al+ZrO ₂	4,2	8,9	
АХФ+Al+Si	4,2	9,9	Без коррозионных повреждений
АХФ+Al+Cr	3,1	6,8	
АХФ+Al+Cr+Si	4,5	8,5	

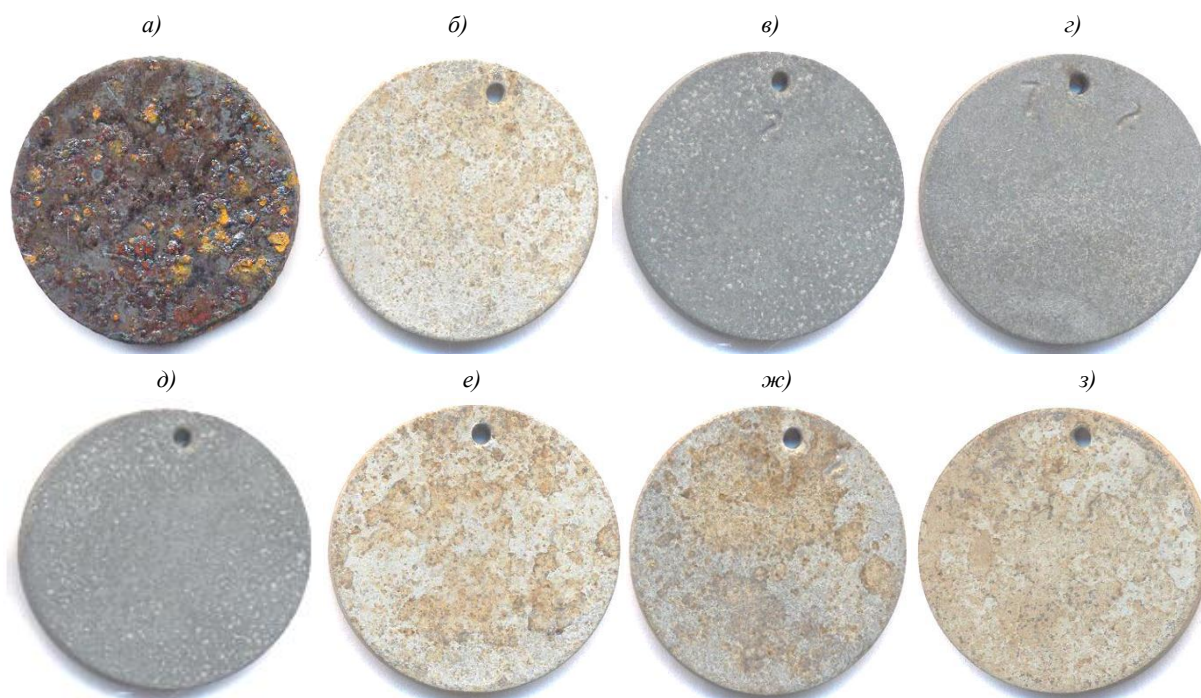


Рисунок 1. Внешний вид образцов из стали ВКС-170 без покрытия (а) и с шликерными покрытиями после 10 циклов ускоренных циклических коррозионных испытаний (УЦКИ) при температуре 450°C: б – АХФ+Al; в – АХФ+Al+Cr; г – АХФ+Al+Cr+Si; д – АХФ+Al+Si; е – АХФ+Al+AlSi; ж – АХФ+Al+TiAl; з – АХФ+Al+ZrO₂

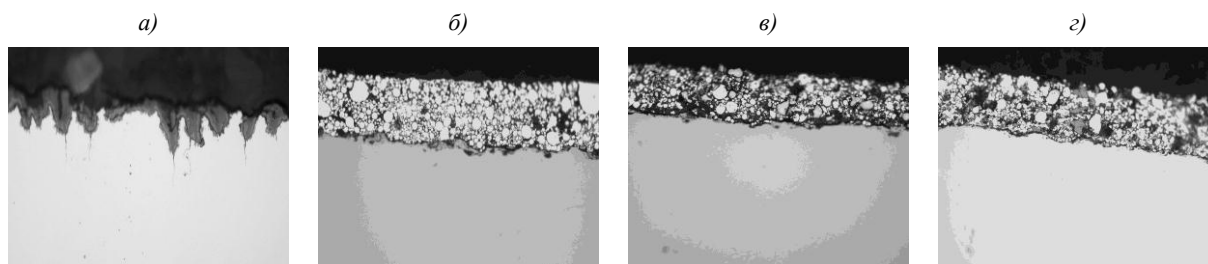


Рисунок 2. Микроструктуры ($\times 500$) образцов из стали ВКС-170 без покрытия (а) и с шликерными покрытиями после 10 циклов УЦКИ при 450°C : б – АХФ+Аl+Cr; в – АХФ+Аl+Cr+Si; з – АХФ+Аl+Si

Проведены испытания образцов из стали ВКС-170 с коррозионностойкими шликерными покрытиями и без покрытия на жаростойкость при температуре 450°C на базе 500 ч. Анализ жаростойкости покрытия проводился гравиметрическим способом по изменению массы образца до и после испытаний. Через каждые 10–25 ч испытаний образцы выгружались из печи, проводился осмотр их внешнего вида и взвешивание. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Проведены 20 циклов УЦКИ при температуре 450°C образцов из стали ВКС-170 и в исходном состоянии (без покрытия) с коррозионностойкими шликерными покрытиями, прошедших испытания на жаростойкость при температуре 450°C на базе 500 ч и без покрытия (табл. 3).

После 20 циклов УЦКИ при 450°C замечено, что поверхность образцов без покрытия усыпана рыхлыми продуктами коррозии, а на образцах с покрытиями составов АХФ+Аl, АХФ+Аl+TiAl и АХФ+Аl+ZrO₂ видны следы коррозии. На образцах с покрытиями составов АХФ+Аl+Si, АХФ+Аl+Cr и АХФ+Аl+Cr+Si следов коррозии не обнаружено.

Методом растровой электронной микроскопии проведено исследование микроструктуры покрытий на образцах из стали ВКС-170 с шликерными покрытиями составов АХФ+Аl+Si, АХФ+Аl+Cr и АХФ+Аl+Cr+Si после последовательных испытаний на жаростойкость (450°C , 500 ч) и УЦКИ при 450°C (20 циклов). Показано, что после таких испытаний покрытие не разрушено и под покрытием очагов коррозии не наблюдается (рис. 3).

Таблица 2

Результаты испытаний на жаростойкость при 450°C на базе 500 ч образцов из стали ВКС-170 без покрытия и с коррозионностойкими покрытиями

Тип покрытия	Удельное изменение массы образцов, г/м ² , в течение, ч				
	50	150	250	350	500
Без покрытия	2,8	6,5	7,6	8,6	11,7
АХФ+Al	0,2	0,5	1,3	1,6	1,9
АХФ+Al+Si	0,2	0,5	1,6	2,1	2,4
АХФ+Al+Cr	0,1	0,5	0,7	1,1	1,2
АХФ+Al+TiAl	0,1	1,3	1,6	2,1	2,6
АХФ+Al+Cr+Si	0,14	0,43	0,92	1,3	1,7
АХФ+Al+ZrO ₂	0,3	1,1	2,0	2,9	3,8

Таблица 3

Результаты УЦКИ при 450°C на базе 20 циклов образцов из стали ВКС-170 без покрытия и с коррозионностойкими шликерными покрытиями, предварительно прошедших испытания на жаростойкость при 450°C на базе 500 ч

Тип покрытия	Удельное изменение массы образцов (после промывки продуктов коррозии), г/м ² , после циклов	
	10	20
Без покрытия	-32,4	-44,9
АХФ+Al	8,7	8,8
АХФ+Al+Si	9,9	9,9
АХФ+Al+Cr	6,0	6,0
АХФ+Al+TiAl	8,0	8,2
АХФ+Al+Cr+Si	6,4	6,4
АХФ+Al+ZrO ₂	8,1	9,0

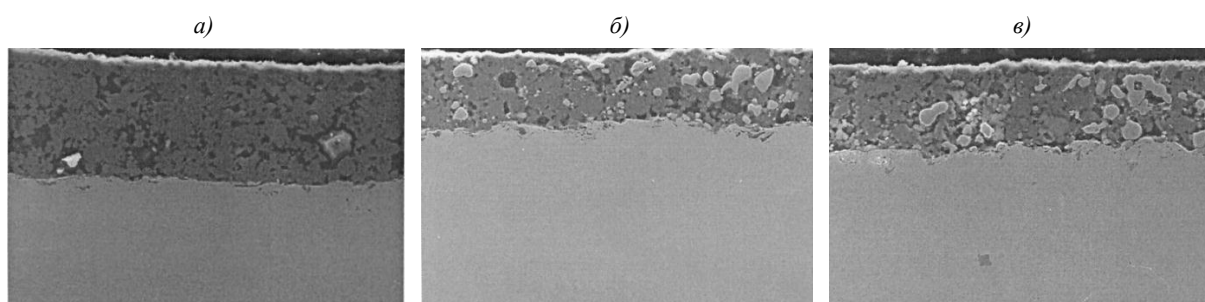


Рисунок 3. Микроструктура ($\times 500$) образцов из стали ВКС-170 с шликерными покрытиями после последовательных испытаний на жаростойкость и УЦКИ при температуре 450°C: а – АХФ+Al+Si; б – АХФ+Al+Cr; в – АХФ+Al+Cr+Si

Проведены испытания на общую коррозионную стойкость образцов из стали ВКС-170 с нанесенными шликерным способом экспериментальными композициями коррозионностойких покрытий составов АХФ+Al+Si, АХФ+Al+Cr и АХФ+Al+Cr+Si в камере солевого тумана (КСТ-35). Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 9.308–85 с не-

прерывным распылением 5%-ного нейтрального раствора хлористого натрия. Оценку коррозионного поведения проводили по времени появления первых продуктов коррозии покрытия и стали, а также по состоянию поверхности образцов на момент снятия с испытаний. Результаты сравнительных коррозионных испытаний в КСТ-35 образцов из высокопрочной стали ВКС-170 с шликерными покрытиями представлены на рис. 4 и в табл. 4.

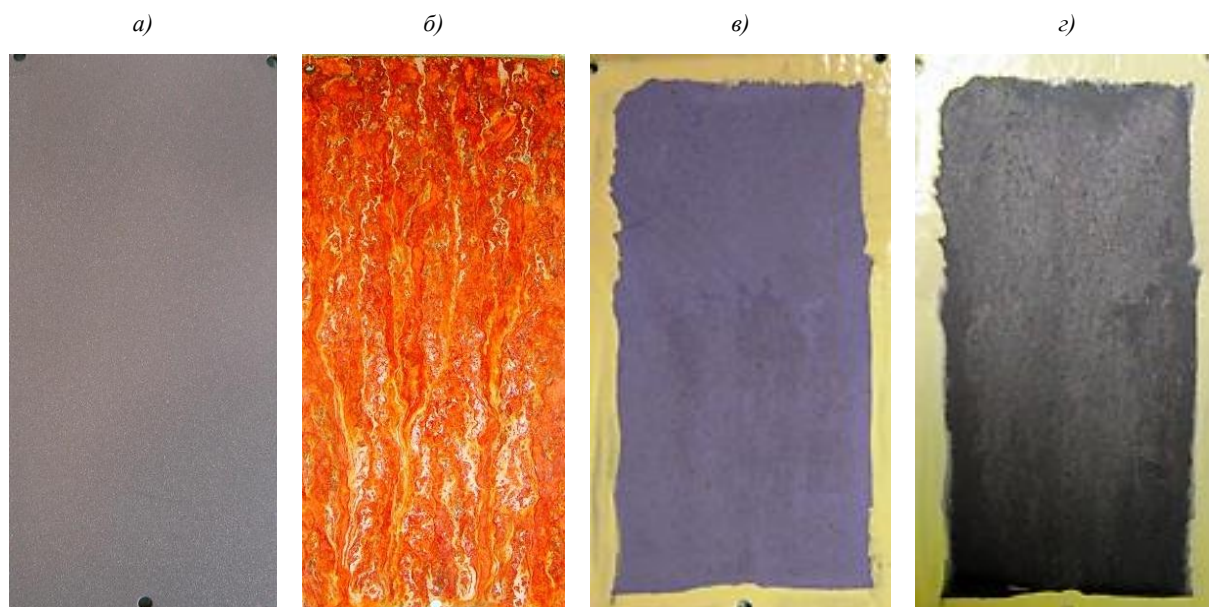


Рисунок 4. Внешний вид образцов из стали ВКС-170 без покрытия (а, б) и с шликерным покрытием АХФ+Al+Si (в, з) до (а) и после испытаний в течение 24 (б, в) и 2136 ч (з) на общую коррозионную стойкость в камере солевого тумана (КСТ-35)

Таблица 4

Результаты сравнительных коррозионных испытаний в камере солевого тумана (КСТ-35) образцов из высокопрочной стали ВКС-170 с шликерными покрытиями

Тип покрытия	Время появления первых продуктов коррозии, ч		Состояние поверхности образцов на момент снятия с испытаний	
	на покрытии	на стали	коррозия стали, %	коррозия покрытия
АХФ+Al+Si	2136	612	<1	Продукты коррозии отсутствуют
АХФ+Al+Cr	338*	24	3–15	
АХФ+Al+Cr+Si	48**	24	10–15	

* Образцы сняты с испытаний через 338 ч.

** Образцы сняты с испытаний через 48 ч.

По результатам испытаний установлено, что шликерное коррозионностойкое покрытие состава АХФ+Al+Si обеспечивает лучшую защиту.

Металлографические исследования образца из стали ВКС-170 с коррозионностойким шликерным покрытием АХФ+Al+Si после 2136 ч испытаний на общую коррозион-

ную стойкость в камере солевого тумана показали отсутствие следов коррозии под покрытием (рис. 5).



Рисунок 5. Микроструктура образца из стали ВКС-170 с коррозионностойким шликерным покрытием АХФ+Al+Si после 2136 ч испытаний на общую коррозионную стойкость в камере солевого тумана (КСТ-35)

Проведены испытания образцов из стали ВКС-170 в исходном состоянии (без покрытия) и с нанесенным коррозионностойким шликерным покрытием состава АХФ+Al+Si на общую коррозионную стойкость в условиях промышленной атмосферы умеренного климата (МЦКИ) в соответствии с ГОСТ 9.909–86. Визуальный осмотр образцов после 90 сут испытаний в условиях МЦКИ показал, что вся поверхность образцов без покрытия покрыта продуктами коррозии (рис. 6, б), на поверхности образцов с коррозионностойким шликерным покрытием АХФ+Al+Si следов коррозии не наблюдается (рис. 6, в). По результатам испытаний установлено, что шликерное коррозионностойкое покрытие состава АХФ+Al+Si обеспечивает защиту от коррозии в условиях промышленной атмосферы умеренного климата образцов из стали ВКС-170.

Металлографические исследования образцов из стали ВКС-170 с коррозионностойким шликерным покрытием АХФ+Al+Si, обеспечивающим лучшую защиту после испытаний в условиях промышленной атмосферы умеренного климата, показали, что после испытаний покрытие не разрушено и под ним следов коррозии не наблюдается (рис. 7).

С целью исследования влияния шликерного покрытия на характеристики механической прочности проведены сравнительные испытания образцов из стали ВКС-170 с коррозионностойким шликерным покрытием АХФ+Al+Si и без покрытия на длитель-

ную прочность и усталость при температуре 450°C. По результатам испытаний определено, что шликерное покрытие не снижает гарантированных паспортных характеристик длительной прочности и выносливости образцов из стали ВКС-170 (табл. 5 и 6).

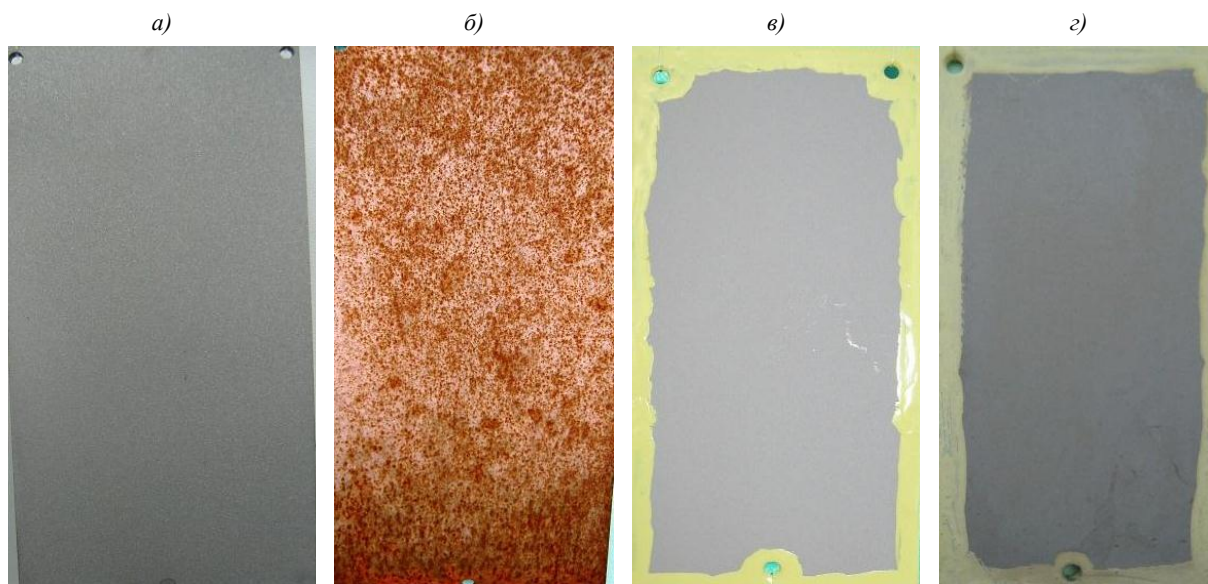


Рисунок 6. Внешний вид образцов из стали ВКС-170 без покрытия (а, б) и с шликерным покрытием АХФ+Al+Si (в, з) до (а, в) и после испытаний в течение 90 сут (б, з) на общую коррозионную стойкость в условиях промышленной атмосферы умеренного климата (МЦКИ)

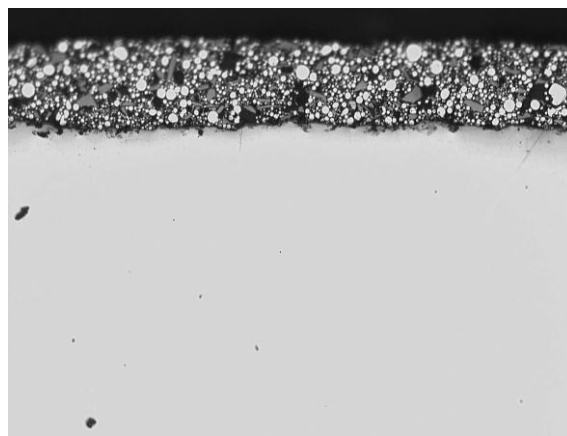


Рисунок 7. Микроструктура образца из стали ВКС-170 с коррозионностойким шликерным покрытием АХФ+Al+Si через 90 сут испытаний на общую коррозионную стойкость в условиях промышленной атмосферы умеренного климата (МЦКИ)

Таблица 5

Результаты испытаний на длительную прочность при температуре 450°C на базе 100 ч образцов из стали ВКС-170 с покрытием и без покрытия

Напряжение, МПа	Тип покрытия	Долговечность при испытании
-----------------	--------------	-----------------------------

		на длительную прочность, ч
824	Без покрытия АХФ+Al+Si	110* 140*; 115*; 115*

* Образцы сняты с испытаний до разрушения.

Таблица 6

Результаты испытаний на многоцикловую усталость гладких образцов из стали ВКС-170 с покрытием и без покрытия при температуре 450°C на базе $2 \cdot 10^7$ циклов

Напряжение σ_1 , МПа	Тип покрытия	Число циклов до разрушения
560	В исходном состоянии	20565000; 30120000
	АХФ+Al+Si	18780000; 18780000 25290000*; 45800000*

* Образец снят с испытаний до разрушения.

Выводы

1. Проведены ускоренные циклические испытания на коррозионную стойкость (УЦКИ) на базе 10 циклов при температуре 450°C экспериментальных образцов из стали ВКС-170 с шликерными покрытиями и без покрытия. По результатам исследования установлено, что лучший показатель коррозионной стойкости (отсутствие следов коррозии на поверхности) после 10 циклов испытаний имели шликерные покрытия составов АХФ+Al+Si, АХФ+Al+Cr и АХФ+Al+Cr+Si.

2. Проведены сравнительные испытания экспериментальных образцов из стали ВКС-170 с защитными покрытиями и без покрытия на жаростойкость по режиму 450°C, 500 ч. Определено, что все шликерные покрытия обладают высоким показателем жаростойкости.

3. Проведены ускоренные циклические испытания на коррозионную стойкость (УЦКИ) на базе 20 циклов при температуре 450°C образцов, прошедших испытания на жаростойкость по режиму 450°C, 500 ч. По результатам испытаний установлено, что лучший показатель коррозионной стойкости (отсутствие следов коррозии на поверхности) после 20 циклов испытаний имели шликерные покрытия составов АХФ+Al+Si, АХФ+Al+Cr и АХФ+Al+Cr+Si.

4. Методом растровой электронной микроскопии проведено исследование микроструктуры покрытий на образцах из стали ВКС-170 с шликерными покрытиями составов АХФ+Al+Si, АХФ+Al+Cr и АХФ+Al+Cr+Si после последовательных испытаний на жаростойкость (450°C, 500 ч) и УЦКИ при 450°C (20 циклов). Исследования показали, что под покрытием очагов коррозии не наблюдается.

5. Проведены испытания на общую коррозионную стойкость образцов из стали ВКС-170 с коррозионностойкими шликерными покрытиями составов АХФ+Al+Si, АХФ+Al+Cr и

АХФ+Al+Cr+Si в камере солевого тумана (КСТ-35) и на общую коррозионную стойкость в условиях промышленной атмосферы умеренного климата. Установлено, что лучшую защиту образцов из стали ВКС-170 обеспечивает шликерное коррозионно-стойкое покрытие состава АХФ+Al+Si.

6. Проведены металлографические исследования образцов из стали ВКС-170 с шликерным коррозионно-стойким покрытием АХФ+Al+Si после 2136 ч испытаний на общую коррозионную стойкость в камере солевого тумана и после 90 сут испытаний в условиях промышленной атмосферы умеренного климата. Установлено, что после испытаний защитное покрытие не разрушено, очаги коррозии под покрытием отсутствуют.

7. Проведены сравнительные испытания образцов из стали ВКС-170 с коррозионно-стойким покрытием состава АХФ+Al+Si и без покрытия на длительную прочность и многоцикловую усталость при температуре 450°C. Показано, что покрытие не снижает гарантированных прочностных характеристик образцов из стали ВКС-170.

8. По результатам исследования образцов из стали ВКС-170 установлено, что высокими защитными свойствами обладает шликерное покрытие состава АХФ+Al+Si, которое может быть рекомендовано в качестве защитного коррозионно-стойкого покрытия для деталей из стали ВКС-170.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
2. Мубояджян С.А. Перспективные покрытия для деталей авиадвигателей //Военный парад. 2009. №1 (91). С. 33.
3. Будиновский С.А., Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Применение аналитической модели определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для рабочих лопаток авиационных турбин //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 26–37.
4. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности //Труды ВИАМ. 2013. №1. Ст. 02 (viam-works.ru).

5. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок //Крылья родины. 2010. №4. С. 31–33.
6. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Нанослойные упрочняющие покрытия для защиты стальных и титановых лопаток компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 3–8.
7. Способ алитирования поверхности внутренней полости лопатки турбины из жаропрочного сплава: пат. 2382830 Рос. Федерация; опубл. 13.08.2008.
8. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 71–81.
9. Луценко А.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Промышленные технологические процессы ионной обработки поверхности /В сб.: Авиационные материалы и технологии. М.: ВИАМ. 2005. №1. С. 30–40.
10. Мубояджян С.А. Особенности осаждения из двухфазного потока многокомпонентной плазмы вакуумно-дугового разряда, содержащего микрокапли испаряемого материала //Металлы. 2008. №2. С. 20–34.
11. Азаровский Е.Н., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности деталей из конструкционных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 20–25.
12. Способ нанесения покрытия для защиты от высокотемпературного окисления поверхности внутренней полости охлаждаемых лопаток турбин из безуглеродистых жаропрочных сплавов на основе никеля: пат. 2471887 Рос. Федерация; опубл. 17.10.2011.
13. Способ нанесения комбинированного жаростойкого покрытия: пат. 2402633 Рос. Федерация; опубл. 31.03.2009.
14. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Металлы. 2007. №5. С. 23–34.
15. Белоус В.Я., Варламова В.Е., Мубояджян С.А., Александров Д.А. Ионно-плазменные покрытия для защиты от коррозии компрессорных лопаток и других деталей ГТД, эксплуатирующихся во всеклиматических условиях //Коррозия: материалы, защита. 2012. №1. С. 20–24.
16. Установка для нанесения защитных покрытий: пат. 2318078 Рос. Федерация; опубл. 26.06.2006.

17. Способ получения литого трубного катода из сплавов на основе алюминия для ионно-плазменного нанесения покрытий: пат. 2340426 Рос. Федерация; опубл. 16.04.2007.
18. Способ получения алюминидного покрытия на поверхности изделия из жаропрочного сплава: пат. 2348739 Рос. Федерация; опубл. 16.04.2007.
19. Способ получения литых трубных изделий из сплавов на основе никеля и/или кобальта: пат. 2344019 Рос. Федерация; опубл. 16.04.2007.
20. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Ионное травление и модифицирование поверхности ответственных деталей машин в вакуумно-дуговой плазме //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 149–163.
21. Состав для получения коррозионностойкого и жаростойкого покрытия на деталях из конструкционных сталей или жаропрочных сплавов на основе никеля: пат. 2455390 Рос. Федерация; опубл. 10.04.2012.
22. Салахова Р.К. Коррозионная стойкость стали 30ХГСА с «трехвалентным» хромовым покрытием в естественных и искусственных средах //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 59–66.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tehnologii ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 7–17.
2. Muboyadzhyan S.A. Perspektivnye pokrytiya dlya detaley aviadvigately [Promising coatings for aircraft engine parts] //Военный парад. 2009. №1 (91). S. 33.
3. Budinovskiy S.A., Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Primenenie analiticheskoy modeli opredeleniya uprugih napryazheniy v mnogosloynnoy sisteme pri reshenii zadach po sozdaniyu vysokotemperaturnykh zharostoykih pokrytiy dlya rabochih lopatok aviatsionnykh turbin [Application of the analytical model of elastic stresses in a multilayer system with the task of building high-temperature coatings for aviation turbine blades workers] //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. S. 26–37.
4. Muboyadzhyan S.A., Lutsenko A.N., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Issledovanie vozmozhnosti povysheniya sluzhebnykh harakteristik lopatok kompressora GTD metodom ionnogo modifitsirovaniya poverhnosti [Research opportunities to improve

- service characteristics of the compressor blades GTE ion-surface modification] //Trudy VIAM. 2013. №1. St. 02 (viam-works.ru).
5. Kablov E.N. Razrabotki VIAM dlya gazoturbinnyyh dvigateley i ustanovok [VIAM development for gas turbine engines and installations] //Kryl'ya rodiny. 2010. №4. S. 31–33.
 6. Muboyadzhyan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Nanosloynnye uprochnyayuschie pokrytiya dlya zaschity stal'nyh i titanovyh lopatok kompressora GTD [Nanolayer strengthening coatings for protection of steel and titanium turbine engine compressor blades] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2011. №3. S. 3–8.
 7. Sposob alitirovaniya poverhnosti vnutrenney polosti lopatki turbiny iz zharoprochnogo splava [Method aluminizing the inner cavity surface of a turbine blade of a superalloy]: pat. 2382830 Ros. Federatsiya; opubl. 13.08.2008.
 8. Muboyadzhyan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S., Egorova L.P., Bulavintseva E.E. Zashitnye i uprochnyayuschie ionno-plazmennye pokrytiya dlya lopatok i drugih otvetstvennykh detaley kompressora GTD [Protecting and strengthening the ion-plasma coatings for blades and other critical parts of the compressor turbine engine] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 71–81.
 9. Lutsenko A.N., Muboyadzhyan S.A., Budinovskiy S.A. Promyshlennyye tehnologicheskie protsessy ionnoy obrabotki poverhnosti [Industrial processes ionic surface treatment] /V sb.: Aviatsionnye materialy i tehnologii. M.: VIAM. 2005. №1. S. 30–40.
 10. Muboyadzhyan S.A. Osobennosti osazhdeniya iz dvuhfaznogo potoka mnogokomponentnoy plazmy vakuumno-dugovogo razryada, sodержaschego mikrokapli isparyaemogo materiala [Features deposition of two-phase flow of a multicomponent plasma vacuum arc containing microdroplets of the evaporated material] //Metally. 2008. №2. S. 20–34.
 11. Azarovskiy E.N., Muboyadzhyan S.A. Modifitsirovanie poverhnosti detaley iz konstruktsionnykh staley v vakuumno-dugovoy plazme titana [Surface modification of parts made of structural steel in the vacuum arc plasma titanium] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2013. №3. S. 20–25.
 12. Sposob naneseniya pokrytiya dlya zaschity ot vysokotemperaturnogo okisleniya poverhnosti vnutrenney polosti ohlazhdaemykh lopatok turbin iz bezuglerodistykh zharoprochnyyh splavov na osnove nikelya [The method of coating for protection against high-temperature oxidation of the inner cavity cooled turbine blades of carbon-free heat-resistant nickel-based alloys]: pat. 2471887 Ros. Federatsiya; opubl. 17.10.2011.

13. Sposob naneseniya kombinirovannogo zharostoykogo pokrytiya [Method of application of combined heat-resistant coating]: pat. 2402633 Ros. Federatsiya; opubl. 31.03.2009.
14. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A., Budinovskiy S.A. Ionno-plazmennye zaschitnye pokrytiya dlya lopatok gazoturbinyh dvigateley [Ion-plasma protective coatings for gas turbine engine blades] //Metally. 2007. №5. S. 23–34.
15. Belous V.Ya., Varlamova V.E., Muboyadzhyan S.A., Aleksandrov D.A. Ionno-plazmennye pokrytiya dlya zaschity ot korrozii kompressornyh lopatok i drugih detaley GTD, ekspluatiruyuschihsya vo vseklimaticheskikh usloviyah [Ion-plasma coatings for corrosion protection of compressor blades and other parts of GTE, operated in all climate conditions] //Korroziya: materialy, zaschita. 2012. №1. S. 20–24.
16. Ustanovka dlya naneseniya zaschitnyh pokrytiy [Apparatus for applying protective coatings]: pat. 2318078 Ros. Federatsiya; opubl. 26.06.2006.
17. Sposob polucheniya litogo trubnogo katoda iz splavov na osnove alyuminiya dlya ionno-plazmennogo naneseniya pokrytiy [A method for producing molded pipe cathode aluminum-based alloys for ion-plasma coating]: pat. 2340426 Ros. Federatsiya; opubl. 16.04.2007.
18. Sposob polucheniya alyuminidnogo pokrytiya na poverhnosti izdeliya iz zharoprochnogo splava [A method of producing aluminide coating on the surface of the superalloy article]: pat. 2348739 Ros. Federatsiya; opubl. 16.04.2007.
19. Sposob polucheniya lityh trubnyh izdeliy iz splavov na osnove nikelya i/ili kobal'ta [A method for producing tubular products of cast alloys based on nickel and/or cobalt]: pat. 2344019 Ros. Federatsiya; opubl. 16.04.2007.
20. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Ionnoe travlenie i modifitsirovanie poverhnosti otvetstvennyh detaley mashin v vakuumno-dugovoy plazme [Ion etching and surface modification of critical components of machinery on a vacuum arc plasma] //Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 149–163.
21. Sostav dlya polucheniya korroziionnostoykogo i zharostoykogo pokrytiya na detalyah iz konstruktsionnyh staley ili zharoprochnykh splavov na osnove nikelya [Composition for corrosion and heat-resistant coating on the details of structural steels and superalloys based on nickel]: pat. 2455390 Ros. Federatsiya; opubl. 10.04.2012.
22. Salahova R.K. Korroziionnaya stoykost' stali 30HGSA s «trehvalentnym» hromovym pokrytiem v estestvennykh i iskusstvennykh sredakh [The corrosion resistance of steel with

30KhGSA «trivalent» chromium plated in natural and artificial environments]
//Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 59–66.