

УДК 629.7.023.224

А.А. Косьмин<sup>1</sup>, С.А. Будиновский<sup>1</sup>, П.В. Матвеев<sup>1</sup>, А.А. Смирнов<sup>1</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ЖС36 С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТОЙКОСТЬ К СУЛЬФИДНО-ОКСИДНОЙ КОРРОЗИИ В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР 850–900°C

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-5-5

Проведены сравнительные исследования стойкости к сульфидно-оксидной коррозии сплава ЖС36 с различными перспективными защитными ионно-плазменными покрытиями. Приведены результаты ускоренных сравнительных испытаний по методике «в солевой корке» при температурах 850 и 900°C на сульфидно-оксидную коррозию образцов из сплава ЖС36 с защитными покрытиями в сравнении с серийно применяемым в промышленности покрытием СДП-6.

**Ключевые слова:** жаростойкие и ионно-плазменные покрытия, ионно-плазменная технология, жаростойкость, защита жаропрочных сплавов, покрытия для лопаток турбины.

*Comparative research of sulfide-oxide corrosion resistance of ZhS36 nickel superalloy with different advanced protective ion-plasma coatings is conducted. Results of accelerated comparative research method («salt shell method») tests of ZhS36 nickel superalloy with advanced protective ion-plasma coatings in comparison with standard SDP-6 coating in temperature range 850–900°C are presented.*

**Keywords:** heat-resistant and ion-plasma coatings, ion-plasma technology, heat-resistance, superalloy protection, coatings for turbin blades.

---

<sup>1</sup>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

### Введение

В настоящее время основной тенденцией развития современных газотурбинных двигателей авиационного назначения, в том числе существующих и перспективных вертолетов, является повышение температуры рабочего газа перед турбиной, что обеспечивает рост тактико-технических и экономических характеристик. В связи с этим представляется целесообразным исследовать возможность применения в вертолетных турбинах новых современных материалов, обладающих по сравнению с используемыми более высокими прочностными характеристиками, что позволит повысить экономическую эффективность данных изделий [1–7].

Разработчики и производители авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) достаточно часто рассматривают возможность создания газоперекачивающих агрегатов, электрогенераторов средней мощности и других промышленных устройств на основе новых или отработавших ресурс авиационных двигателей после внесения в их конструкцию необходимых изменений.

### Материалы и методы

Для исследований выбраны ионно-плазменные покрытия, разработанные ранее для защиты лопаток авиационных и транспортных турбин, эксплуатирующихся в

условиях сульфидно-оксидной коррозии (СОК). Покрытия представляют собой композицию, которая формируется в процессе вакуумного отжига после нанесения на поверхность защищаемой детали внутреннего слоя из никелевого сплава СДП-1 системы Ni(Co)–Cr–Al–Y и внешнего слоя из алюминиевого сплава ВСДП-13 системы Al–Si–Ni–B [8, 9].

Исследованы покрытия: серийное СДП-6; двухслойные конденсационно-диффузионные СДП-1+ВСДП-13 и СДП-6+ВСДП-13; трехслойное СДП-1+Ti+ВСДП-13.

Серийное покрытие СДП-6 рассматривали в качестве базового для сравнительной оценки коррозионной стойкости конденсационно-диффузионных покрытий. Введение в композицию СДП-1+ВСДП-13 тонкого слоя Ti, что усложняет технологию получения покрытия, выполнили для легирования им поверхности покрытия, так как он обладает высоким сопротивлением сульфидной коррозии. Это позволило провести исследования с использованием серийного сплава СДП-1 без выплавки экспериментального сплава системы Ni(Co)–Cr–Al–Y–Ti. Для получения слоя титана использовали сплав ВТ1-0 (технически чистый титан).

Конденсационно-диффузионные покрытия были получены в две или три стадии. На первой стадии процесса на поверхность исследуемых образцов из жаропрочных сплавов осаждали внутренний конденсированный слой покрытия из сплавов СДП-1 или СДП-6. Затем на часть образцов с покрытием СДП-1 нанесли слой титана толщиной 5 мкм. После этого на все образцы нанесли слой алюминиевого сплава ВСДП-13 и провели вакуумную термообработку при 1000°C в течение 4 ч для формирования внешнего диффузионного алюминидного слоя покрытия. Покрытия СДП-1 и СДП-6 имели толщину 75–80 мкм. Толщина покрытия из алюминиевого сплава ВСДП-13 до вакуумного отжига составляла 15–18 мкм. После проведения отжига на поверхности конденсационно-диффузионных покрытий сформировался слой на основе легированного моноалюминид никеля толщиной ~50 мкм.

Покрытия наносили на промышленной установке ионно-плазменного осаждения МАП-2 по серийной технологии [10–13] при силе тока вакуумной дуги 500–700 А, электрическом потенциале подложки 5–10 В и давлении вакуума  $10^{-2}$  Па, что исключает возможность окисления материала покрытий.

Стойкость композиций «сплав–покрытие» к СОК оценивали по результатам испытаний цилиндрических образцов диаметром 10 мм и длиной 25 мм из жаропрочных литейных никелевых сплавов:

- ЖС6У системы Ni–Cr–Al–W–Co–Ti–Mo–Nb–C – широко используется в промышленности для изготовления рабочих лопаток турбин с равноосной структурой;
- ЖС26 системы Ni–Cr–Al–W–Co–Ti–Mo–Nb–V–C с направленной структурой;
- ЖС36 системы Ni–Cr–Al–W–Co–Ti–Mo–Nb–Re;
- ЖСКС2 системы Ni–Cr–Al–W–Co–Ti–Ta–Re.

Сплавы ЖС36 и ЖСКС2 применяют для изготовления лопаток с монокристаллической структурой, при этом сплав ЖСКС2 имеет повышенную коррозионную стойкость благодаря повышенному содержанию в его составе хрома и титана [14–16].

При разработке новых коррозионностойких защитных покрытий проводят сравнительные лабораторные испытания, которые при относительно небольшой длительности по отношению к ресурсу работы реальных ГТУ позволяют выявить покрытия с наиболее высокими свойствами. Лабораторные коррозионные испытания покрытий проводят с использованием различных методик. Сложные и дорогие методики предусматривают исследование покрытий в камерах сгорания и на специальных стендах в продуктах сгорания топлива (в условиях, близких к натурным). Для сокращения сроков натуральных испытаний в продукты горения топлива

впрыскивают водные растворы солей для повышения концентрации агрессивных реагентов. Более широкое применение в исследованиях нашли тигельные методики. Испытания на СОК в тиглях проводят при нагреве в электрической печи до необходимой температуры с полным или частичным погружением образцов с покрытиями в расплав солей. Расплав солей может быть заменен нанесением тонкого поверхностного слоя смеси солей (солевая корка), имитирующей отложения золы на поверхности пера лопаток ГТУ. Для приготовления расплавов солей и отложений золы используют сульфат натрия или его смесь с хлоридом натрия [4, 5, 7]. Сравнение коррозионных свойств покрытий проводят либо с незащищенным сплавом, либо с серийными покрытиями по глубине коррозионного повреждения поверхности, потере удельной массы с поверхности образца после удаления продуктов коррозии, количеству очагов повреждений на поверхности при точечной коррозии.

В работе использована методика циклических испытаний, разработанная в ВИАМ для оценки коррозионных свойств жаропрочных сталей и сплавов. Цикл испытаний включает в себя нанесение на поверхность подогретого образца солевой корки из водного раствора смеси солей  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{NaCl}$  в пропорции 3:1 путем распыления. Затем проводят выдержку образцов в тиглях на воздухе при температуре испытаний в течение 1 ч и охлаждение до комнатной температуры. Взвешивание образцов производили после каждых 5 циклов с предварительным удалением продуктов коррозии с поверхности путем промывки образцов в теплой дистиллированной воде. Продолжительность испытаний составила 30 циклов (1 цикл: 1 ч). В экспериментах определяли среднее арифметическое значение удельного изменения массы (отношение изменения массы образца к площади его поверхности) трех образцов каждой исследованной композиции «сплав–покрытие».

Следует отметить, что выбор методики и температур испытаний провели по результатам предварительных экспериментов, которые показали, что при испытаниях в расплаве тех же солей при температурах 750–900°C все рассмотренные в работе покрытия обладают удовлетворительной стойкостью к СОК. Методика циклических испытаний с использованием возобновляемой солевой корки на поверхности образцов оказалась наиболее «жесткой» и позволила определить преимущества того или иного покрытия на выбранной базе испытаний.

Металлографические исследования покрытий проводились на оптическом микроскопе Olympus GX 51, анализ локального химического состава покрытий – на приборе JСМА-733 фирмы Jeol с использованием энергодисперсионного микроанализатора Inca Energy.

Характеристики длительной прочности определяли при 1050°C на установке ZST2/3-ВИЭТ в соответствии с требованиями ГОСТ 10145, а усталости – при 900°C на испытательной машине МВИ-611М по ГОСТ 25.502.

### Результаты

По результатам исследований сплава ЖС36 выявлено, что при температуре испытаний 750°C все покрытия обладают высокой коррозионной стойкостью, в связи с чем трудно определить, какое из них обладает наилучшими характеристиками. Значительные отличия коррозионных свойств покрытий проявляются при температуре 850°C, поэтому дальнейшие исследования проводились при этой температуре и выше.

В качестве основы выбрано покрытие СДП-1+ВСДП-13. Для повышения защитных свойств данного покрытия было предложено два варианта его модифицирования.

Первый вариант заключался во введении в покрытие титана (СДП-1+Ti+ВСДП-13), который положительно влияет на стойкость к коррозии. Легирование покрытия осуществлялось путем нанесения конденсированного слоя титана (BT1-0) толщиной

10 мкм на поверхность конденсированного слоя покрытия СДП-1 с последующим осаждением алюминидного слоя сплава ВСДП-13 и проведением диффузионного отжига.

Второй вариант заключался в формировании металлокерамического слоя покрытия на основе оксидов металлов, входящих в состав сплава СДП-1, путем подачи реакционного газа (кислорода) в камеру установки МАП-2 в процессе нанесения сплава СДП-1. Вследствие плазмохимических реакций происходило избирательное образование керамических частиц из металлов, входящих в состав сплава покрытия. В связи с тем, что керамика достаточно инертна к расплавам солей металлов (а данные металлокерамические слои в покрытиях являются диффузионным барьером для элементов), предполагалось, что данный слой значительно снизит скорость распространения продуктов коррозии в глубину покрытия и тем самым увеличит его ресурс работы.

Полученные экспериментальные данные по удельному изменению массы и скорости коррозии образцов из сплава ЖС36 с покрытиями представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Скорость СОК образцов из сплава ЖС36 при температуре 850°C

Покрытие	Скорость коррозии, г/(м <sup>2</sup> ·ч)*
СДП-1+ВСДП-13	$\frac{0,31-0,83}{0,62}$
СДП-1+O <sub>2</sub> +ВСДП-13	$\frac{-9,44-12,98}{11,07}$
СДП-1+Ti+ВСДП-13	$\frac{-0,33-0,44}{0,17}$

\* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

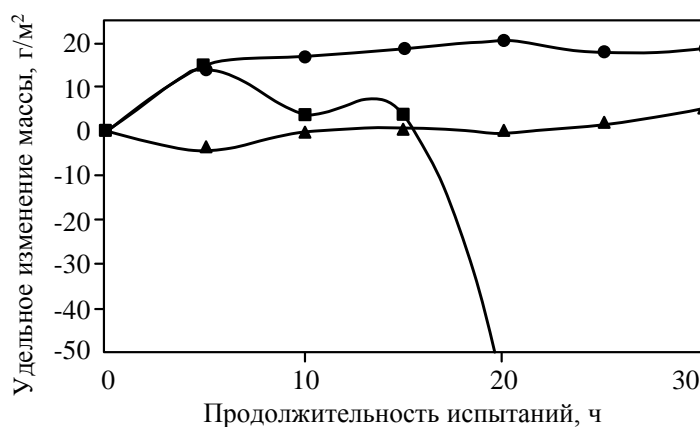


Рис. 1. Зависимость удельного изменения массы образцов из сплава ЖС36 с покрытиями СДП-1+O<sub>2</sub>+ВСДП-13 (■), СДП-1+Ti+ВСДП-13 (▲) и СДП-1+ВСДП-13 (●) от продолжительности испытаний в условиях сульфидно-оксидной коррозии при температуре 850°C

Результаты гравиметрических исследований сплава ЖС36 с различными типами покрытий после испытаний на СОК при температуре 850°C в течение 30 циклов показали, что из трех покрытий композиция с титаном (СДП-1+Ti+ВСДП-13) обладает более высокой стойкостью к коррозии. При использовании кислорода в процессе нанесения покрытий (СДП-1+O<sub>2</sub>+ВСДП-13) стойкость к СОК при 850°C резко снижается (более чем в 4 раза по сравнению с покрытием СДП-1+ВСДП-13).

Однако результаты визуального осмотра состояния образцов в процессе и после прохождения заданной базы испытаний (рис. 2) не совпадают с результатами гравиметрических исследований.

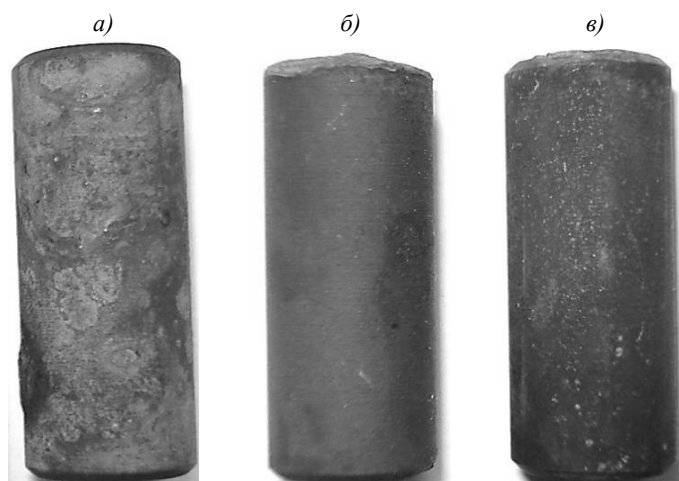


Рис. 2. Внешний вид образцов из сплава ЖС36 с покрытиями СДП-1+Ti+ВСДП-13 (а), СДП-1+O<sub>2</sub>+ВСДП-13 (б) и СДП-1+ВСДП-13 (в) после 30 циклов испытаний в условиях сульфидно-оксидной коррозии при температуре 850°С

Проведенные гравиметрические исследования не дают однозначной и точной оценки защитных свойств покрытий в связи с тем, что начинается преждевременное разрушение образца с торцевой поверхности вследствие наличия на ней неоднородностей (клеймо с номером образца и отверстие под технологическую оснастку), которые активизируют процесс протекания СОК.

Осмотр внешнего вида образцов с подслоем титана показывает, что при испытаниях (рис. 2, а) на образцах появились крупные очаги коррозии кратерообразной формы, что свидетельствует о потере защитных свойств поверхностного слоя покрытия при данных условиях испытаний. Однако никакого значительного разрушения торцевой поверхности образцов не произошло, что положительно повлияло на результаты гравиметрических исследований.

Осмотр внешнего вида поверхности образцов с покрытиями СДП-1+O<sub>2</sub>+ВСДП-13 и СДП-1+ВСДП-13 (рис. 2, б, в) показывает, что на них отсутствуют следы каких-либо значительных коррозионных повреждений. Однако на образцах с покрытием СДП-1+O<sub>2</sub>+ВСДП-13 обнаружен скол с торцевой поверхности, что и обуславливает плохие результаты при гравиметрических исследованиях данного типа покрытия, так как скорость коррозии защищаемого сплава значительно превышает скорость коррозии покрытия.

Металлографические исследования показали, что на образцах с покрытием с подслоем титана (рис. 3, а) наблюдается незначительное появление мелких коррозионных пор глубиной до 40 мкм, что составляет 50% от толщины покрытия. На образцах с покрытием СДП-1+O<sub>2</sub>+ВСДП-13 (рис. 3, б) под ним обнаружены горизонтальные каналы, появление которых, по-видимому, связано с проникновением продуктов коррозии и выборочным коррозионным повреждением слоев под покрытием с определенным составом. Однако внешний вид покрытий свидетельствует о сохранении ими защитных свойств на выбранной базе испытаний.

Металлографический анализ образцов с покрытием СДП-1+ВСДП-13 показал (рис. 3, в), что коррозионные поры проникают в глубь внешнего слоя покрытия на основе β-фазы. По результатам визуального осмотра поверхности этих образцов (рис. 2, в) покрытие имеет наилучший внешний вид с минимальными повреждениями.

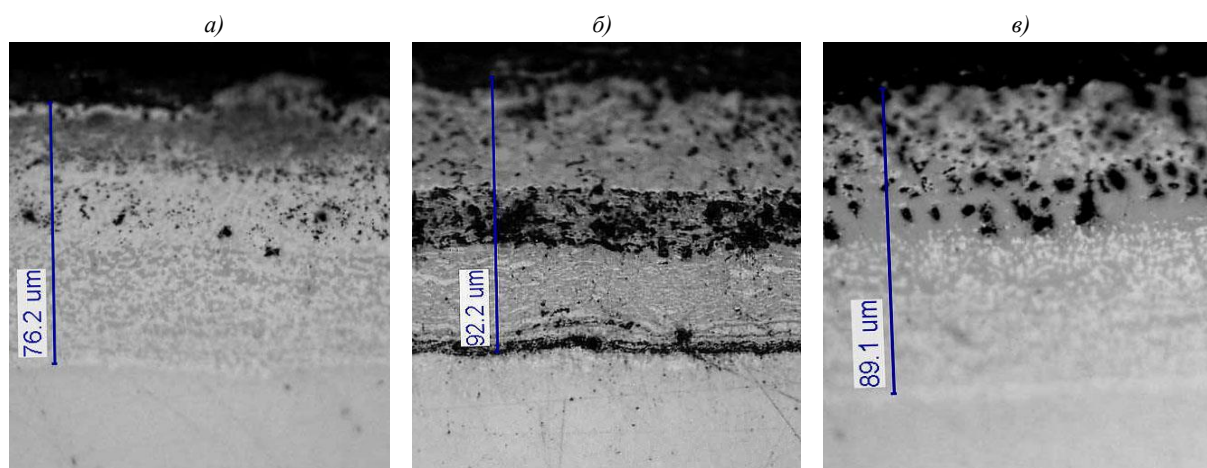


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 500$ ) образцов из сплава ЖС36 с покрытиями СДП-1+Ti+ВСДП-13 (а), СДП-1+O<sub>2</sub>+ВСДП-13 (б) и СДП-1+ВСДП-13 (в) после испытаний на сульфидную коррозию при 850°C на базе 30 ч

С учетом результатов испытаний композиций на сплаве ЖС36 были предложены новые конструкции покрытий и испытания образцов проводили при температуре 900°C.

Для увеличения точности оценки гравиметрических исследований предложено провести дополнительное нанесение покрытия на торцевую поверхность образцов для устранения эффекта их преждевременного разрушения. Дополнительный процесс нанесения проводился в специальной оснастке, предотвращающей попадание покрытия на основную (боковую) поверхность образцов, и по режиму, соответствующему основному режиму нанесения покрытия для каждого типа образцов.

Типы изученных покрытий и результаты гравиметрических измерений представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Таблица 2

Удельное изменение массы образцов из сплава ЖС36 с покрытием в условиях сульфидно-оксидной коррозии

Покрытие	Удельное изменение массы образцов, г/м <sup>2</sup> , при 900°C в течение, ч					
	5	10	15	20	25	30
СДП-1+ВСДП-13	10	13	15	14	13	16
СДП-1+ВСДП-15	6	6	6	5	-9	-73
СДП-6+ВСДП-13	5	3	0,5	-1	-7	-78
СДП-6	8	3	-6	-41	-128	-107
СДП-1+ВСДП-13+ВСДП-15	7	6	8	12	-14	13

По результатам гравиметрического анализа (рис. 4) показано, что в процессе испытаний на СОК при температуре 900°C на образцах из сплава ЖС36 с покрытиями СДП-6, СДП-6+ВСДП-13 и СДП-1+ВСДП-15 после 20–25 циклов испытаний наблюдается резкое снижение массы.

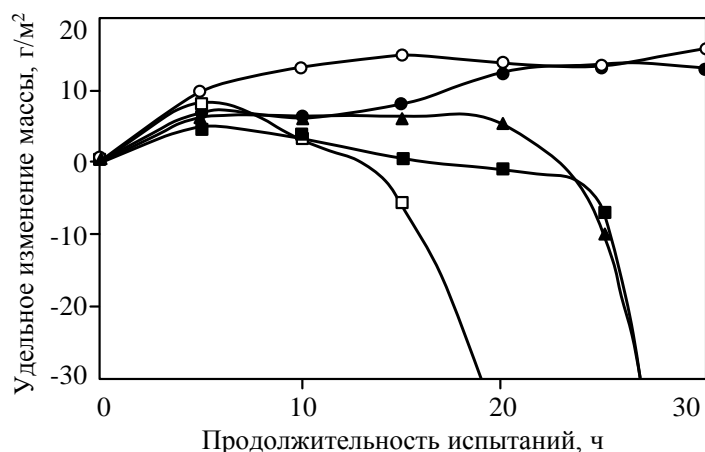


Рис. 4. Зависимость удельного изменения массы образцов из сплава ЖС36 с покрытиями СДП-1+ВСДП-13 (○), СДП-6+ВСДП-13 (■), СДП-1+ВСДП-13+ВСДП-15 (●), СДП-1+ВСДП-15 (▲) и СДП-6 (□) от продолжительности испытаний в условиях сульфидно-оксидной коррозии при температуре 900°C

Осмотр внешнего вида покрытий показал, что уже после 20 циклов испытаний на поверхности образцов с покрытиями из сплава СДП-6 появляются очаги питтинговой коррозии кратерообразной формы и наблюдается вспучивание (рис. 5, в, г), что в сумме с гравиметрическими данными свидетельствует о потере покрытиями защитных свойств.

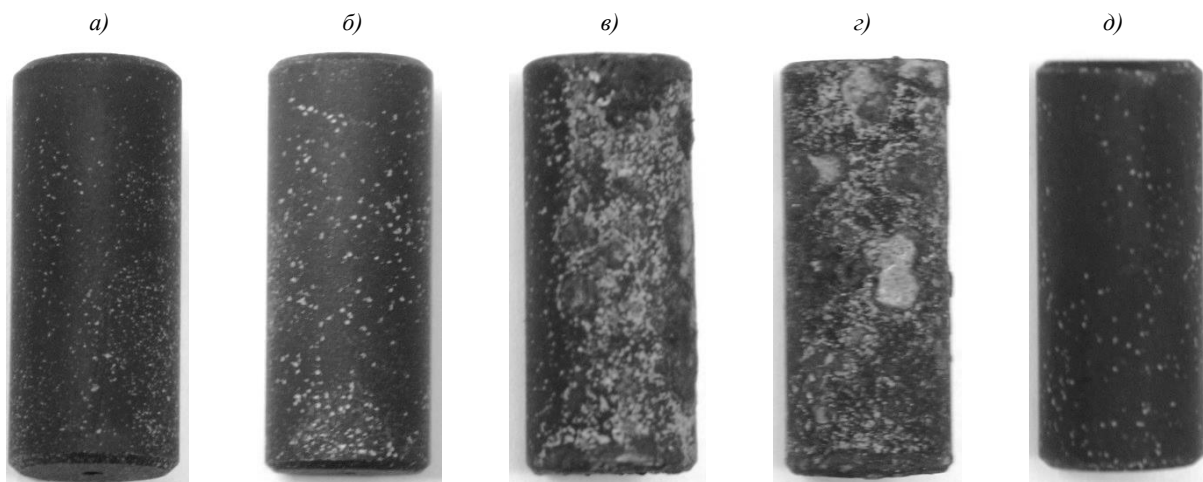


Рис. 5. Внешний вид образцов из сплава ЖС36 с покрытиями СДП-1+ВСДП-13 (а), СДП-1+ВСДП-15 (б), СДП-6+ВСДП-13 (в), СДП-6 (г) и СДП-1+ВСДП-13+ВСДП-15 (д) при испытаниях на сульфидную коррозию при 900°C после 20 циклов

Дальнейшие исследования выявили, что лучшими свойствами по стойкости к сульфидной коррозии по результатам визуальной оценки состояния поверхности образцов после испытаний при температуре 900°C на базе 30 циклов обладают покрытия с подслоем из сплава СДП-1. Эти покрытия по количеству циклов испытаний (до появления коррозионных повреждений) в 1,5–2 раза превышают коррозионную стойкость покрытия с подслоем из сплава СДП-6, что также подтверждают результаты гравиметрических исследований (рис. 4). У образцов с покрытием СДП-1+ВСДП-15 уже после 25 циклов испытаний наблюдается снижение массы, что может являться результатом начала процессов выработки и снижения защитных свойств покрытия. Данные выводы

подтверждаются металлографическими исследованиями (рис. 5). Видно, что покрытие на образцах с конденсированным слоем из сплава СДП-6 полностью выработалось, и начался процесс разрушения основного материала (рис. 5, в, з). На образцах с покрытием СДП-1+ВСДП-15 (рис. 5, б) покрытие сохранилось, но перестало выполнять защитные функции, так как в нем появились многочисленные винтовые каналы по всей глубине с проникновением в материал подложки.

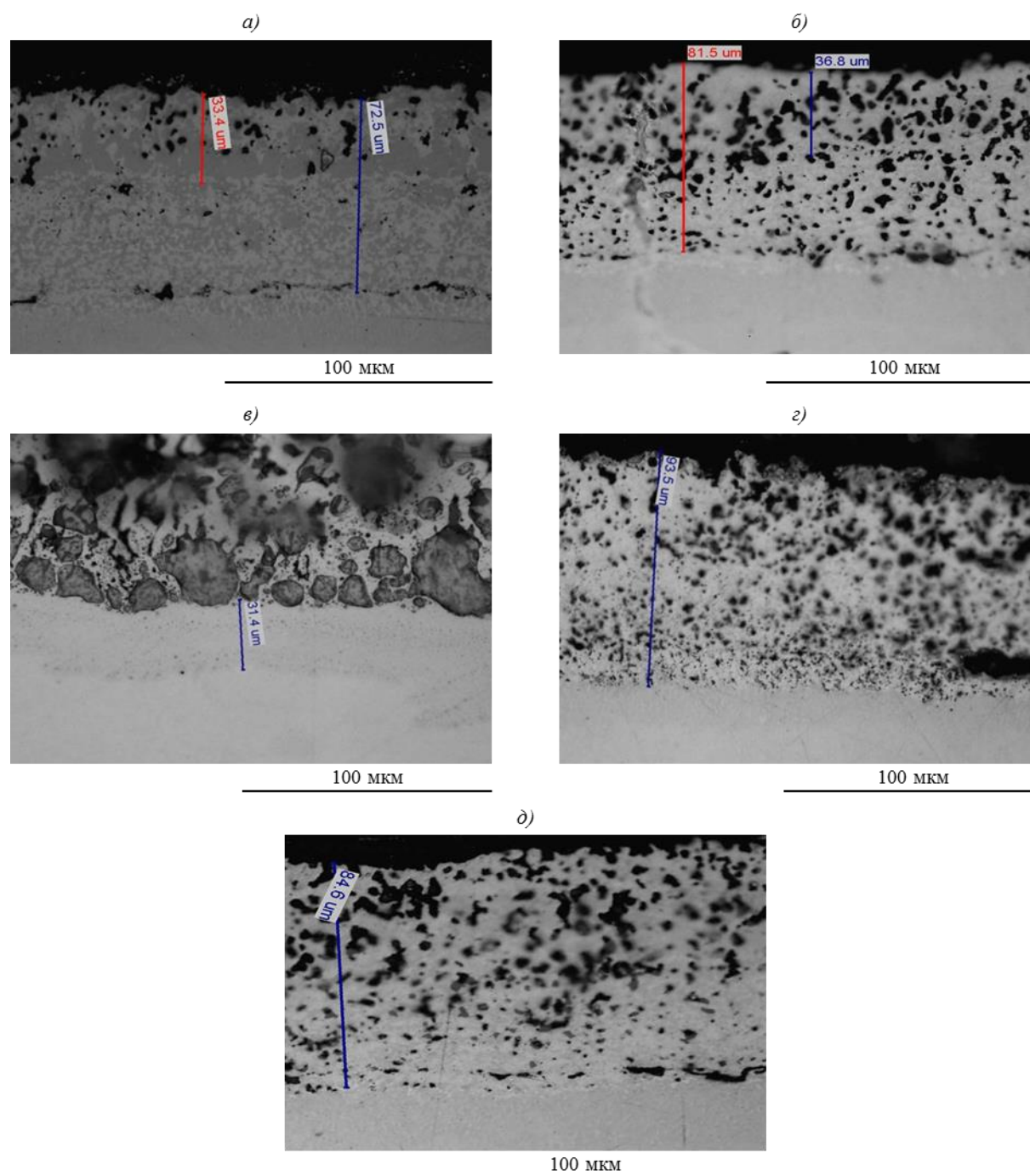


Рис. 6. Микроструктура ( $\times 500$ ) образцов из сплава ЖС36 с покрытиями СДП-1+ВСДП-13 (а), СДП-1+ВСДП-15 (б), СДП-6+ВСДП-13 (в), СДП-6 (з) и СДП-1+ВСДП-13+ВСДП-15 (д) после испытаний в условиях сульфидно-оксидной коррозии при 900°C на базе 30 циклов

Внешний вид поверхности и гравиметрические исследования систем покрытий СДП-1+ВСДП-13 и СДП-1+ВСДП-13+ВСДП-15 показали, что данные покрытия после 30 циклов испытаний полностью сохраняют защитные свойства. Однако в системе СДП-1+ВСДП-13+ВСДП-15 (рис. 6, д) наблюдается появление пор, по-видимому, связанных с пространственными винтовыми каналами, образующимися в процессе коррозии практически по всей глубине покрытия. На образцах с покрытием СДП-1+ВСДП-13 (рис. 6, а) наблюдаются поры глубиной до 40 мкм, что составляет 50% от толщины покрытия и свидетельствует о более высоких защитных свойствах данного покрытия в условиях испытаний.

Дальнейшие испытания образцов (без проведения гравиметрических исследований) показали значительное превосходство покрытия СДП-1+ВСДП-13, которое прошло 60 циклов испытаний до разрушения покрытия.

Проведенные механические испытания показали, что покрытие СДП-1+ВСДП-13 не снижает длительной прочности сплава ЖС36 при температуре 1000°C на базе испытаний до 500 ч и многоциклового усталости сплава при 900°C на базе  $2 \cdot 10^7$  циклов.

### Обсуждение и заключения

Ионно-плазменное покрытие СДП-1+ВСДП-13, нанесенное на жаропрочный сплав ЖС36, в условиях сульфидно-оксидной коррозии превосходит серийное покрытие СДП-6 по коррозионной стойкости в 1,5–2 раза (по количеству циклов испытаний до разрушения при температурах 850–900°C).

Для повышения коррозионных свойств покрытия СДП-1+ВСДП-13 в условиях сульфидно-оксидной коррозии при температурах до 900°C целесообразно легирование его титаном.

Покрытие с оксидным слоем показало хорошие результаты по стойкости к сульфидно-оксидной коррозии, однако его скалывание в процессе испытаний, которое, по-видимому, связано с разницей температурного коэффициента линейного расширения, не позволяет применять его для защиты жаропрочных сплавов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Машиностроение. 2008. Т. 2. С. 159–192.
2. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е., Горюнов А.В. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 97–105.
3. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой. Ч. II //Материаловедение. 1997. №5. С. 14–16.
4. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 36–52.
5. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой. Ч. I //Материаловедение. 1997. №4. С. 32–39.
6. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Каблов Д.Е. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных и интерметаллидных сплавов с монокристаллической структурой //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP4. С. 20–25.
7. Жаропрочный сплав на никелевой основе для монокристаллического литья: пат. 2439184 Рос. Федерация; опубл. 05.10.2010.

8. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность при-морской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) //Коррозия: материалы, защита. 2013. №12. С. 6–18.
9. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP4. С. 13–19.
10. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 60–70.
11. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Конверсия в машиностроении. 1999. №2. С. 42–47.
12. Матвеев П.В., Будиновский С.А. Исследование свойств защитных жаростойких покрытий для интерметаллидных никелевых сплавов типа ВКНА для рабочих температур до 1300°C //Авиационные материалы и технологии. 2014. №3. С. 22–26.
13. 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.
14. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising GTES //Russian metallurgy (Metally). 2012. V. 2012. №1. P. 1–7.
15. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Защитные жаростойкие покрытия для сплавов на основе интерметаллидов никеля //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 12–15.
16. 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. №S. С. 71–81.