

УДК 629.7.023

А.А. Косьмин¹, С.А. Будиновский¹, С.А. Мубояджян¹**ЖАРО- И КОРРОЗИОННОСТОЙКОЕ ПОКРЫТИЕ
ДЛЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ
ИЗ ПЕРСПЕКТИВНОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВЖЛ21**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-17-24

Разработано покрытие и технология его нанесения на лопатки ТВД. Проведены термоусталостные испытания по режимам, имитирующим работу двигателя ТВ3-117, рабочих лопаток второй ступени из сплава ВЖЛ21 при температуре 480→770→480°C на базе 800 циклов до появления первой трещины. Показано, что рабочие лопатки второй ступени из сплава ВЖЛ21 с защитным покрытием системы СДП-1Т+ВСДП-13 прошли заданную базу испытаний без видимых признаков повреждения. Проведена оценка влияния данного покрытия на длительную прочность и многоцикловую усталость сплава ВЖЛ21. Показано положительное влияние покрытия на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии в интервале температур 850–950°C, а также на жаростойкость при температуре до 1050°C.

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

Coating and its application on turbine blades has been developed. Thermal fatigue tests of VZhL21 alloy rotor blades at a temperature of 480→770→480°C powered by 800 cycles before the first crack have been carried out on modes simulating the operation of engine TV3-117. It is shown that VZhL21 alloy rotor blades with a protective coating system SDP-1T+VSDP-13 were fully tested with no visible signs of damage. The influence of this coating on long-term durability and high-cycle fatigue of alloy VZhL21 has been evaluated. The positive effect of the coating on resistance to sulfide-oxide corrosion at the temperature range of 850–950°C, and also heat resistance at temperature up to 1050°C has been shown.

Keywords: coatings, heat resisting coatings, ion-plasma coatings, ion-plasma technology, heat resistance, protection of high-temperature alloys, coatings for turbine blades.

¹Федеральное 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 основная тенденцией развития современных газотурбинных двигателей авиационного назначения, в том числе для существующих и перспективных вертолетов, является повышение температуры рабочего газа турбины, что обеспечивает рост тактико-технических и экономических характеристик. В связи с этим представляется целесообразным исследовать возможность применения в вертолетных турбинах новых современных материалов, обладающих более высокими, по сравнению с используемыми, прочностными характеристиками, а также меньшей плотностью, что позволит уменьшить массу двигателя и, соответственно, повысить экономическую эффективность данных изделий. Для реализации этих задач возможно применение новых жаропрочных литейных никелевых сплавов для равноосного литья серии ВЖЛ, разработанных во ФГУП «ВИАМ», с повышенной удельной прочностью.

Современные жаропрочные сплавы серии ВЖЛ [1] вследствие особенностей своего состава обладают относительно невысокой коррозионной

стойкостью. В то же время с учетом особенностей эксплуатации вертолетов на более низких высотах по сравнению с самолетами и в окружении приземных слоев или морской атмосферы [2–4] ставится задача защиты лопаток турбин для повышения стойкости к сульфидно-оксидной коррозии (СОК) из-за возможности отложения солей различных элементов на поверхности пера лопаток.

Одним из основных факторов, влияющих на долговечность лопаток турбин ГТУ и ГТД, является высокотемпературное окисление. Изначально жаропрочные сплавы имели относительно высокое содержание хрома, который в процессе окисления формировал на поверхности изделия сплошную, медленно растущую, оксидную пленку Cr₂O₃. Однако с ростом температуры и компрессии газа в турбине увеличивается скорость роста оксидной пленки Cr₂O₃, а также образуются летучие оксиды хрома, что приводит к значительному снижению жаростойкости. Дальнейший рост температуры вызывает необходимость снижения содержания хрома в сплавах (в первую очередь из-за прочностных

характеристик) и повышения алюминия, образующего на поверхности оксидную пленку Al_2O_3 , обладающую более высокой стабильностью при повышенных температурах [5–8].

Жаростойкие покрытия для жаропрочных сплавов – независимо от их состава и метода нанесения – повышают содержание алюминия на поверхности лопаток при формировании защитной оксидной пленки на основе Al_2O_3 для обеспечения более длительного ресурса [9–11]. Как правило, покрытия легированы различными элементами – например, Y или Hf, повышающими адгезионные свойства оксидного слоя.

Однако при высоких температурах значительно увеличивается диффузионная подвижность алюминия из поверхностного слоя покрытия в защищаемый сплав, что приводит к снижению жаростойких свойств. Для снижения диффузии применяются так называемые диффузионные барьерные покрытия, формирующиеся на границе «сплав–покрытие», а также осуществляется легирование материалов покрытия элементами, повышающими фазовую стабильность покрытия.

Несмотря на то что высокотемпературное окисление ограничивает срок службы лопаток турбин, данный тип разрушения распространяется с достаточно прогнозируемой и относительно постоянной скоростью при определенной температуре. В то время как интенсивность протекания СОК может быть настолько высока, что лопатки турбины, способные отработать в условиях высокотемпературного окисления десятки тысяч часов, могут быть разрушены в течение нескольких сот часов [12]. В связи с этим изучению данного типа разрушения посвящено большое количество работ как в России, так и за рубежом. При этом за рубежом для обозначения данного типа разрушения часто используют термин «Hot Corrosion» (горячая коррозия).

Причиной возникновения СОК является попадание в турбину различных солей, а также различных примесей из топлива или атмосферы. При этом тип, интенсивность и механизм развития СОК может зависеть от множества факторов: вида и количества продуктов, влияющих на возникновение коррозии (типа топлива, региона эксплуатации), температурных режимов работы турбины, а также материала лопаток.

Сульфидно-оксидная коррозия материалов турбины начинается, когда на поверхности деталей появляется расплав солей. После определенного инкубационного периода (накопления) появившиеся на поверхности расплавы вступают в реакции с поверхностным защитным оксидным слоем, разрушая и проникая под него, и начинается более быстрый этап развития коррозионного разрушения материала. Существует два широко признанных типа СОК, отличающихся по режимам распространения и температурам протекания [5, 6, 12, 13]:

– *первый тип* коррозии наблюдается в интервале между температурой плавления осажденных солей и точкой росы продуктов коррозии. Обычно температурный интервал для данного типа СОК определяется в интервале 750–900°C и называется высокотемпературной СОК. Примером является осаждение отложений сульфата натрия. Данная форма коррозионного поражения характеризуется появлением внутренних сульфидных фаз под поверхностью материала из избирательных легирующих элементов данного сплава при довольно ровной и на первый взгляд не поврежденной поверхности;

– *второй тип* СОК происходит в области относительно невысоких температур (обычно указывают 600–750°C). Данная форма повреждений характеризуется формированием на поверхности при конденсации сульфата натрия различных эвтектических расплавов, например: Na_2SO_4 –50% $CoSO_4$ ($T_{пл}=565^\circ C$) и Na_2SO_4 –38% $NiSO_4$ ($T_{пл}=671^\circ C$) [14, 15]. Данные продукты коррозии очень нестабильны и требуют постоянного притока и высокой концентрации SO_3 . Интенсивная коррозия происходит в интервале температур жидкой фазы данных соединений – от температуры плавления до температуры диссоциации. Данный тип повреждения характеризуется вспучиванием, образованием на поверхности и в подповерхностных слоях продуктов коррозии и появлением питтинговой коррозии. Этот вид также называется низкотемпературной горячей коррозией.

В связи с вышеизложенным возникла необходимость в создании покрытия для лопаток турбин ГТД, способного сочетать высокие коррозионные свойства при температурах до 1000°C с хорошей жаростойкостью до 1050–1100°C, а также в разработке технологии их нанесения на лопатки ГТД.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионные и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [16].

Материалы и методы

Нанесение покрытий на образцы и лопатки из сплава ВЖЛ21 проводили на вакуумной ионно-плазменной установке с автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУ ТП) типа МАП-2.

Испытания на изотермическую жаростойкость проводили на дисковых образцах диаметром 25,4 мм и высотой 2 мм без покрытия и с покрытиями в атмосферной печи в керамических тиглях с крышками при температуре 1050°C. Оценку жаростойких свойств сплавов и сплавов с

покрытием осуществляли гравиметрическим методом путем взвешивания образцов каждые 5–20 ч испытаний и определения изменения удельной массы образцов без учета массы окалины, осыпавшейся с их поверхности.

Испытания на стойкость к СОК проводили по методике сравнительных ускоренных циклических испытаний, разработанной в ВИАМ для оценки коррозионных свойств жаропрочных сталей и сплавов. Цикл испытаний включает нанесение на поверхность подогретого образца солевой корки из смеси солей Na_2SO_4 и NaCl в пропорции 3:1 распылением водного раствора. Затем образцы выдерживают в тиглях на воздухе при температуре испытаний в течение 1 ч и охлаждают до комнатной температуры. Взвешивание образцов производят после каждых 5 циклов с предварительным удалением продуктов коррозии с поверхности путем промывки образцов в теплой дистиллированной воде.

На установке ZST2/3-ВИЭТ определяли длительную прочность образцов в соответствии с ГОСТ 10145–81, на оптическом микроскопе Veramet-2 и приборе JCMA-733 изучали микроструктуру, элементный и фазовый состав покрытий и зоны диффузионного взаимодействия покрытия с основой. Определение многоциклового усталости проводили при 900°C на базе $2 \cdot 10^7$ циклов на сервогидравлической испытательной машине MTS в соответствии с ГОСТ 25.502–79.

Термоусталостные испытания рабочих лопаток из сплава ВЖЛ21 выполнены на экспериментальной установке с омическим нагревом по параметрам, имитирующим температурный режим полетного цикла вертолетного двигателя.

Результаты и обсуждение

Для оценки свойств сплава ВЖЛ21 с жаростойким покрытием, по разработанной технологии на образцы из данного сплава нанесено по-

крытие СДП-1Т+ВСДП-13 на установке МАП-2. Данное покрытие разработано на основании ранее проводимых исследований и показало свои преимущества по комплексу свойств в сравнении с серийно применяемыми покрытиями: жаростойким – СДП-2+ВСДП-13 и коррозионностойким – СДП-6.

Проведенные исследования циклической жаростойкости образцов из сплава ВЖЛ21 с защитным покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 на базе испытаний 200 циклов при температуре $1050 \pm 200^\circ\text{C}$ показали, что при данных условиях испытаний наблюдается незначительный, на уровне 15 г/м^2 (рис. 1, а), рост массы образцов с покрытием, т. е. масса сформировавшихся в поверхностном слое покрытия оксидов превышает массу осыпавшейся окалины, следовательно, разрушения покрытия не происходит и оно продолжает выполнять свои защитные функции.

Проведенные исследования изотермической жаростойкости образцов из сплава ВЖЛ21 с защитным покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 при температуре 1050°C на базе испытаний 500 ч показали аналогичные результаты с циклической жаростойкостью. Наблюдается также незначительный, на уровне 10 г/м^2 (рис. 1, б), рост массы образцов с покрытием.

Проведены металлографические (ГОСТ 22838–77) и металлофизические (рентгеноструктурный и микроанализ) исследования образцов из сплава ВЖЛ21 с защитным покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 после испытаний на изотермическую и циклическую жаростойкость. Установлено, что произошло незначительное увеличение зоны диффузионного взаимодействия на границе «сплав–покрытие» вследствие повышенной диффузионной подвижности элементов, входящих в состав покрытия. Однако наличие на поле шлифа в покрытии темных участков свидетельствует о наличии в нижнем слое покрытия

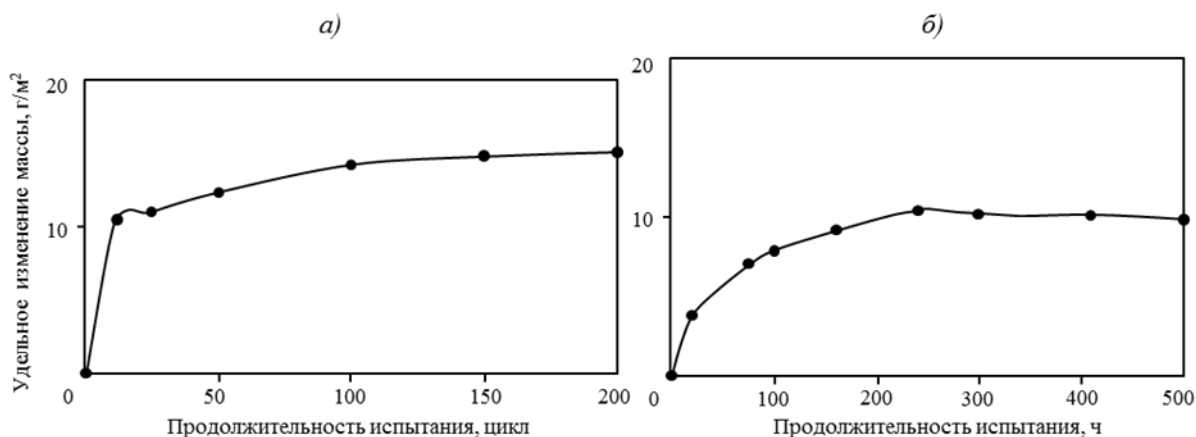


Рис. 1. Удельное изменение массы образцов из сплава ВЖЛ21 с покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 в зависимости от продолжительности испытания на циклическую жаростойкость при температуре $1050 \pm 200^\circ\text{C}$ на базе 200 циклов (а) и на изотермическую жаростойкость при температуре 1050°C (б)

β -фазы, которая обладает наибольшей жаростойкостью. Основной фазой является γ' -фаза, также обладающая высокой жаростойкостью, при среднем содержании алюминия в покрытии 13,5% (по массе), что указывает на сохранение жаростойких свойств покрытия вне зависимости от типа испытаний (рис. 2).

Проведены исследования стойкости к СОК сплава ВЖЛ21 с защитным покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 при температуре 900°C и установлено, что на базе 40 циклов данное покрытие надежно защищает сплав от коррозионного разрушения. Внешний вид образца представлен на рис. 3.

По результатам исследования стойкости к СОК сплава ВЖЛ21 с защитным покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 при температуре 950°C установлено также, что данное покрытие сохраняет

свою работоспособность после 30 циклов испытаний. В данном случае оценку стойкости покрытия к коррозионным повреждениям проводили металлографическим способом путем измерения глубины проникновения продуктов коррозии в покрытие. Видно (рис. 4), что глубина повреждения покрытия составляет не более 50% от его толщины, следовательно, покрытие продолжает выполнять свои защитные функции.

Металлографические (по ГОСТ 10243–75) и металлофизические (рентгенофазовый анализ, микрорентгеноспектральный анализ по ММ1.595-17-222–2004) исследования показали, что защитное покрытие СДП-1Т+ВСДП-13 на сплаве ВЖЛ21 после испытаний на стойкость к СОК при 950°C сохраняется, основной фазой является жаростойкая γ' -фаза Ni_3Al с содержанием

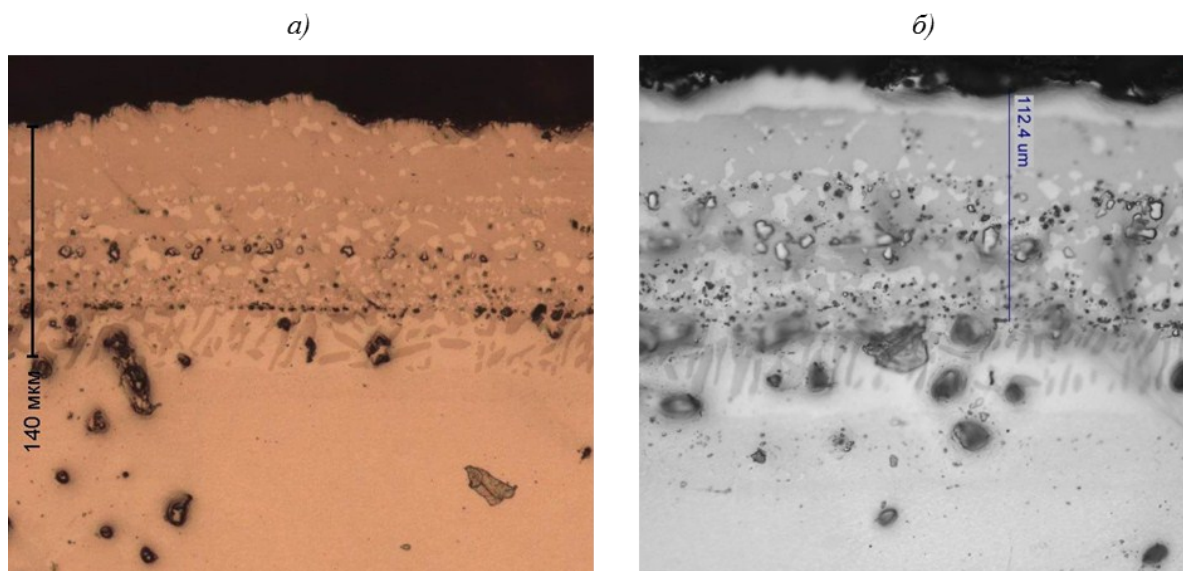


Рис. 2. Микроструктура образца из сплава ВЖЛ21 с покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 после испытания на циклическую жаростойкость при температуре $1050 \pm 200^\circ\text{C}$ на базе 200 циклов (а) и на изотермическую жаростойкость при температуре 1050°C на базе 500 ч (б)



Рис. 3. Внешний вид образца из сплава ВЖЛ21 с защитным покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 после 40 циклов испытаний на сульфидно-оксидную коррозию при 900°C

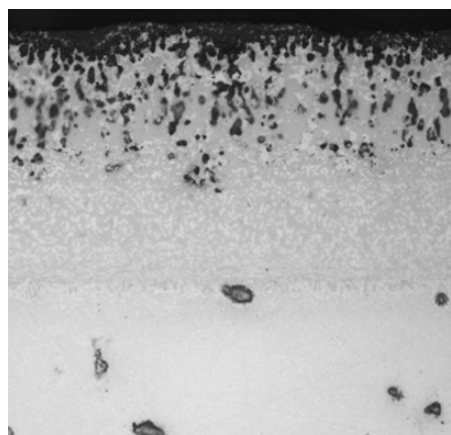


Рис. 4. Микроструктура образца из сплава ВЖЛ21 с защитным покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 после 30 циклов испытаний на сульфидно-оксидную коррозию при 950°C

алюминия на уровне 18% (по массе), следовательно, покрытие продолжает выполнять свои защитные функции.

Исследование длительной прочности сплава ВЖЛ21 с защитным покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 при температуре 1000°C на базах 10; 100 и 500 ч показало, что покрытие не снижает паспортных гарантированных характеристик сплава ВЖЛ21. Расчетные значения длительной прочности (жаропрочности), полученные по результатам испытаний, представлены в табл. 1.

Исследование многоциклового усталости (МнЦУ) сплава ВЖЛ21 с защитным покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 при температуре 900°C на базе $2 \cdot 10^7$ циклов показало, что покрытие (как и в случае испытаний на длительную прочность) не снижает гарантированных паспортных характеристик сплава ВЖЛ21. Расчетные значения предела выносливости, полученные по результатам испытаний, представлены в табл. 2.

Для оценки равномерности покрытия на установке МАП-2 наносили покрытие СДП-1Т+ВСДП-13 на поверхность отливок рабочих лопаток второй ступени из сплава ВЖЛ21.

Для оценки равномерности нанесения покрытий на заготовки рабочих лопаток второй ступени

из сплава ВЖЛ21 на микроскопе Olympus GX 51 с цифровой системой обработки изображения при увеличении $\times 500$ проведены металлографические исследования по ГОСТ 22838–77. Видно (рис. 5), что скорость осаждения покрытия СДП-1Т+ВСДП-13 на заготовки рабочих лопаток второй ступени из сплава ВЖЛ21 при использовании в процессе нанесения технологической оснастки, изготовленной по разработанным чертежам, полностью соответствует полученным ранее результатам на образцах. Толщина покрытия не превышает 80 мкм. Разница в толщине покрытия на «спинке» и «корыте» лопатки составляет <5%. При этом на «спинке» наблюдается большая толщина покрытия, что является вполне удовлетворительным, так как температура на входной кромке лопатки самая высокая из-за чего на ней происходит более интенсивная выработка защитного покрытия.

Результаты металлографического контроля покрытий на обоих типах лопаток показали, что защитные покрытия плотно прилегают к подложке, микротрещин и микропор на границе раздела «сплав–покрытие» не выявлено.

Для оценки механических свойств лопаток с покрытием проведены испытания на термоусталость

Таблица 1

Средние значения длительной прочности сплава ВЖЛ21 с защитным покрытием СДП-1Т+ВСДП-13

Характеристики		Значения характеристик при температуре испытания 1000°C		
Жаропрочность (ГОСТ 10145–81)	Напряжение, МПа	255	165	120
	Время до разрушения, ч	10	100	500

Таблица 2

Значение МнЦУ сплава ВЖЛ21 с защитным покрытием СДП-1Т+ВСДП-13

Характеристика	Значение характеристики при температуре испытания 900°C
Предел выносливости σ_{-1} , МПа, на базе $2 \cdot 10^7$ циклов на гладких образцах по ГОСТ 25.502–79	300

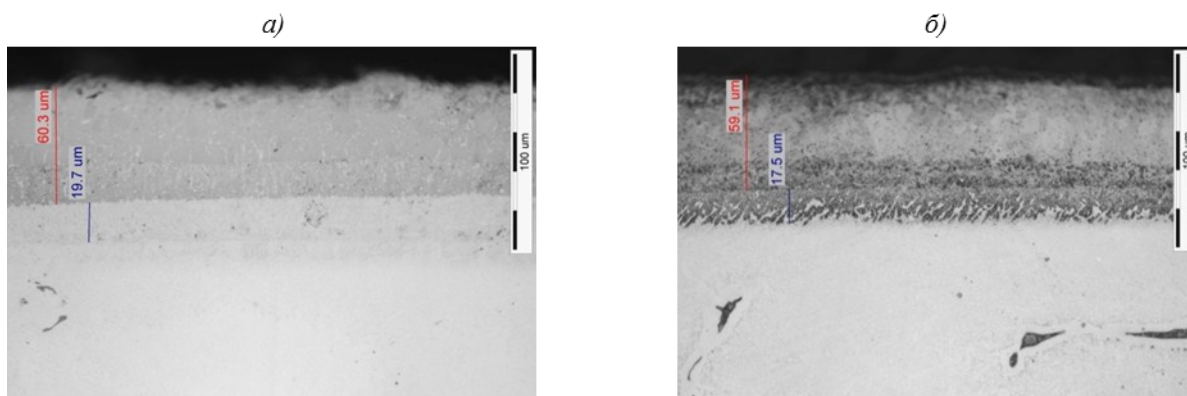


Рис. 5. Микроструктура комбинированного покрытия СДП-1Т (4 ч)+ВСДП-13 (50 мин), нанесенного на «спинку» в районе входной кромки (а) и «корыто» (б) лопатки, выполненной из сплава ВЖЛ21

рабочих лопаток второй ступени из сплава ВЖЛ21 (3 шт. – с покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 и 3 шт. – без покрытия) и сопловых лопаток турбины из сплава ВИН3 (3 шт. – с покрытием СДП-42+ВСДП-16 и 3 шт. – без покрытия) с последующим анализом структуры материала – проведена оценка влияния защитных покрытий на образование трещин при испытаниях на термоусталость.

Испытания на термоусталость проводились по ГОСТ 25.502–79 по режимам, имитирующим работу двигателя ТВ3-117: время выхода на режим «малый газ» (МГ) составляет 45–60 с, время перехода с режима МГ на «максимальный» режим (МАХ) и назад – по 10 с, время перехода с режима МГ в исходное состояние: 30–40 с (полное время одного термоцикла 485–510 с). Испытания лопаток проведены в идентичных условиях на оборудовании и с помощью методики, обеспечивающей воспроизводимость термоцикла при его многократных повторениях.

Испытания на термоусталость показали, что для рабочих лопаток второй ступени из сплава ВЖЛ21 с покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 при температуре 480→770→480°C на базе 800 циклов на поверхности лопаток видимых трещин не обнаружено. Внешний вид лопаток после испытаний представлен на рис. 6.

После испытаний на термоусталость на различных базах проведены металлографические исследования, которые показали, что защитные покрытия СДП-1Т+ВСДП-13 не имеют отслоений от основного металла. После наработки 800 циклов в покрытиях возникают единичные поперечные микротрещины, как правило, затупляющиеся на границе контакта с поверхностью металла.

По результатам испытаний выявлено, что покрытие полностью сохраняется и не имеет отслоений от основного металла, что свидетельствует о работоспособности системы «сплав–защитное покрытие» в условиях, имитирующих работу вертолетного двигателя при повышенных температурах.

Для подтверждения защитных свойств покрытия проведены исследования стойкости к СОК непосредственно рабочих лопаток второй ступени из сплава ВЖЛ21 с защитным покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 при температуре 950°C и установлено, что данное покрытие сохраняет свою работоспособность после 50 циклов испытаний. В данном случае оценку стойкости покрытия к коррозионным повреждениям проводили металлографическим способом путем измерения глубины проникновения продуктов коррозии в покрытие. Видно (рис. 7), что глубина повреждения покрытия составляет не более 60 мкм, следовательно, покрытие продолжает выполнять свои защитные функции.

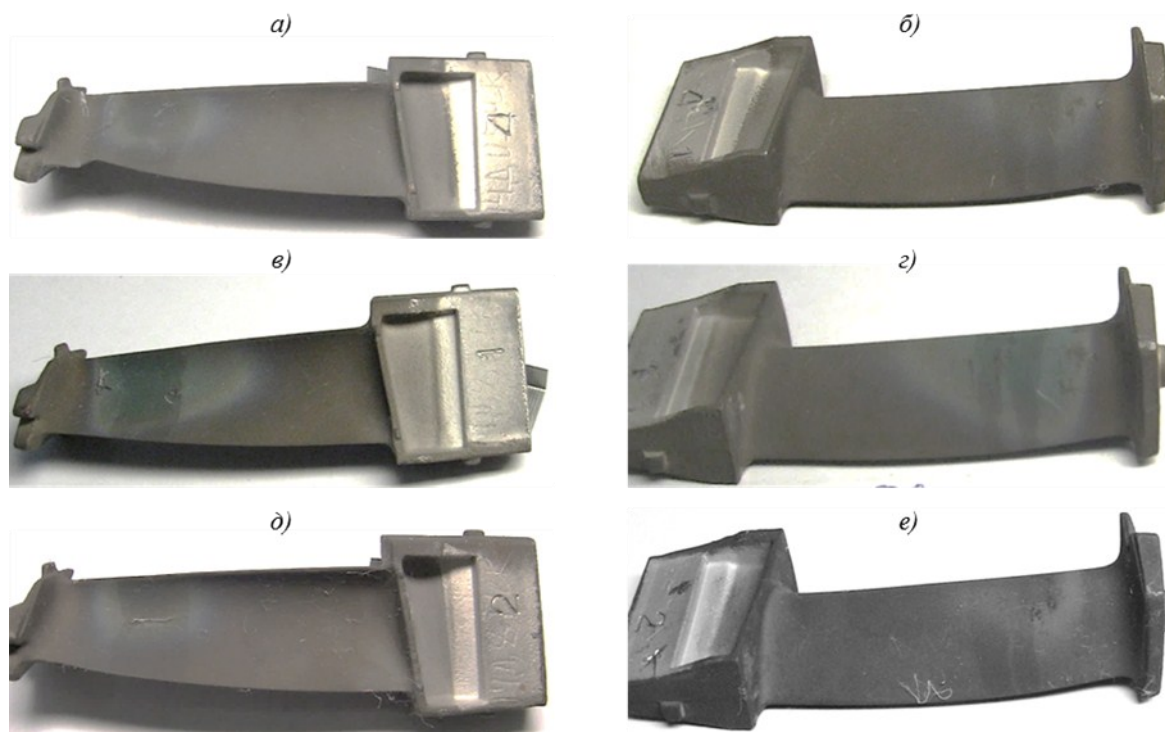


Рис. 6. Внешний вид рабочих лопаток (сняты без разрушения) из сплава ВЖЛ21 со стороны «корыта» (а, в, д) и «спинки» (б, з, е) с защитным покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 после испытаний на термоусталость с наработкой 280 (а, б), 500 (в, з) и 800 циклов (д, е)

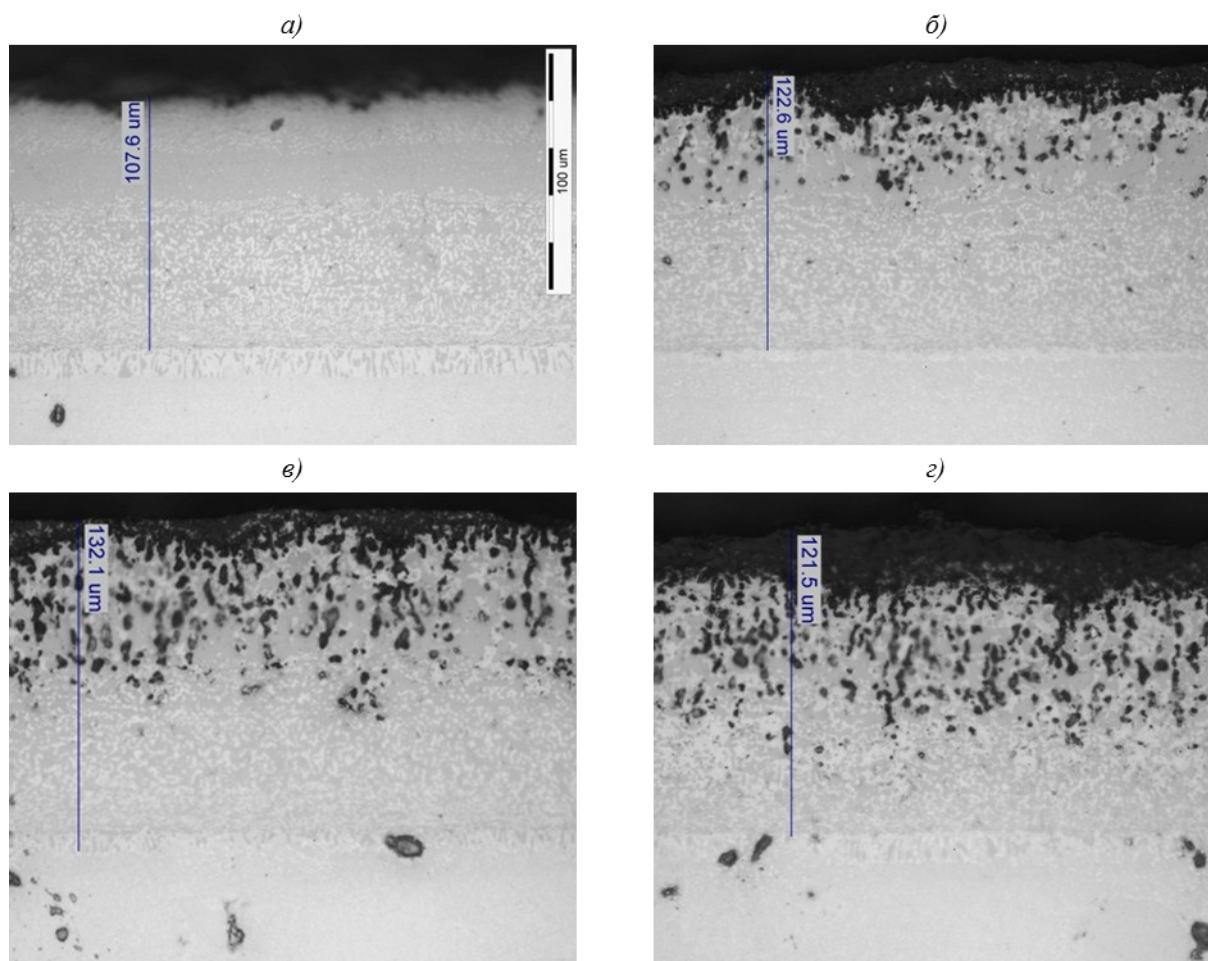


Рис. 7. Микроструктура ($\times 500$) сплава ВЖЛ21 с покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 после испытаний на сульфидно-окислительную коррозию при температуре 950°C в исходном состоянии (а) и после испытаний в течение 30 (б), 40 (в) и 50 циклов (г)

Заключения

Проведено опробование технологий нанесения защитного покрытия СДП-1Т+ВСДП-13 на рабочие лопатки второй ступени из сплава ВЖЛ21. Установлено, что защитное покрытие имеет плотную структуру, поверхность раздела «сплав–покрытие» на рабочих лопатках не имеет пористости, сколов и трещин.

Проведены испытания на термоусталость по режимам, имитирующим работу двигателя ТВ3-117, рабочих лопаток второй ступени из сплава ВЖЛ21 при температуре $480 \rightarrow 770 \rightarrow 480^{\circ}\text{C}$. Показано, что рабочие лопатки второй ступени из сплава ВЖЛ21 с защитным покрытием системы СДП-1Т+ВСДП-13 прошли базу испытаний в 800 циклов без видимых признаков повреждения.

Проведены металлографические исследования структуры сопловых и рабочих лопаток после термоциклирования. Показано, что защитные покрытия полностью сохраняются, не имеют отслоений от основного металла, что свидетельствует о

работоспособности системы «сплав–защитное покрытие» в условиях, имитирующих работу вертолетного двигателя.

Проведенные испытания на стойкость к СОК по методике ускоренных циклических испытаний показали, что покрытие СДП-1Т+ВСДП-13 обеспечивает защиту рабочих лопаток второй ступени из сплава ВЖЛ21 на базах >50 циклов.

Исследование длительной прочности и многоциклового усталости сплава ВЖЛ21 с защитным покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 показало, что данное покрытие не снижает гарантированных паспортных прочностных характеристик сплава ВЖЛ21.

Неохлаждаемые рабочие лопатки второй ступени из сплава ВЖЛ21 с защитным покрытием СДП-1Т+ВСДП-13 могут быть рекомендованы для применения в перспективном вертолетном двигателе ВК-2500М в качестве роторных деталей, работающих в условиях высокотемпературного окисления и СОК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 36–52.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // *Коррозия: материалы, защита*. 2013. №12. С. 6–18.
3. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследования коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
4. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Антипов В.В., Каримова С.А., Рудаков А.Г., Оглодков М.С. Влияние коррозионной среды на скорость роста трещины усталости в алюминиевых сплавах // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №3. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.07.2016).
5. *Superalloys* / ed. by C.T. Sims, N.S. Stoloff, W.C. Hagel. USA, New York: Wiley, 1987. Vol. II. 568 p.
6. Birks N., Meier G.H., Petit F.S. *Introduction to the High emperature Oxidation of Metals*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 338 p.
7. Каблов Е.Н., Кривоногов Г.С. Легирование и фазовая нестабильность высокопрочных коррозионно-стойких сталей // *Металлы*. 2002. №2. С. 65–73.
8. Каблов Е.Н., Кривоногов Г.С. Роль границ зерен в охрупчивании высокопрочных коррозионно-стойких сталей // *Металлы*. 2002. №1. С. 35–41.
9. Галоян А.Г., Мубояджян С.А., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Коррозионно-стойкое покрытие для защиты деталей ГТД из высокопрочных конструкционных мартенситостареющих сталей на рабочие температуры до 450°C // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №6. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-3-3.
10. Гаямов А.М., Будиновский С.А. Исследование влияния толщины барьерного слоя покрытия на свойства композиций из жаропрочных сплавов ВЖМ1 и ЖС36 с жаростойким покрытием // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №9. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-3-3.
11. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Горлов Д.С. Повышение свойств упрочняющих ионно-плазменных покрытий при помощи ассистированного осаждения // *Труды ВИАМ : электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №7. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-7-7.
12. Никитин В.И. *Коррозия и защита лопаток газовых турбин*. Л.: Машиностроение, 1987. 272 с.
13. Kofstad P. *High Temperature Corrosion*. Springer, 1988. 542 p.
14. Luthra K.L., Shores D.A. Mechanism of Na₂SO₄ induced corrosion at 600–900°C // *J. Electrochem. Soc.* 1980. No. 10. P. 2202–2210.
15. Shepard S.B. Navsea Marine Gas Turbine Materials Development Program // *Naval Engineers Journal*. No. 8. P. 65–75.
16. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГИЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.