

УДК 669.017:669.018.44

Е.Н. Азаровский<sup>1</sup>, О.Н. Доронин<sup>1</sup>, С.А. Мубояджян<sup>1</sup>

## ОБРАЗОВАНИЕ ПОРИСТОСТИ НА ГРАНИЦЕ «ЖАРОПРОЧНЫЙ СПЛАВ–ЖАРОСТОЙКОЕ КОНДЕНСАЦИОННО-ДИФФУЗИОННОЕ ПОКРЫТИЕ»

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-113-120

*Проведены исследования образования пористости на границе «жаропрочный сплав ЖС26–жаростойкое конденсационно-диффузионное покрытие». На поверхность образцов наносили ионно-плазменное жаростойкое конденсационно-диффузионное покрытие системы NiCoCrAlY+AlNiY (СДП-4+ВСДП-16) с различной толщиной конденсированного слоя из сплава СДП-4 (19; 38 и 76 мкм) при одинаковой толщине слоя из сплава ВСДП-16 (17 мкм). Часть образцов с покрытием подвергли вакуумному термодиффузионному отжигу по стандартной технологии.*

*Проведены исследования образцов в исходном состоянии и после вакуумного отжига, приведены их микроструктуры и результаты микрорентгеноспектрального анализа (МРСА).*

*Показано, что на образцах из жаропрочного сплава ЖС26 с конденсированным покрытием СДП-4 толщиной 19 и 38 мкм в процессе вакуумного отжига на границе «жаростойкий сплав ЖС26–жаростойкое конденсационно-диффузионное покрытие» системы СДП-4+ВСДП-16 образуется цепочка пор. На образце из сплава ЖС26 с конденсированным покрытием СДП-4 толщиной 76 мкм поры на границе «сплав–покрытие» не образуются.*

**Ключевые слова:** жаропрочный никелевый сплав, ионно-плазменное конденсационно-диффузионное покрытие, диффузионные процессы, эффект Киркендалла, микроструктура, растровая электронная микроскопия.

Е.Н. Azarovskiy<sup>1</sup>, O.N. Doronin<sup>1</sup>, S.A. Muboyadzhyan<sup>1</sup>

## FORMATION OF POROSITY ON THE BORDER «OF HEAT-RESISTANT ALLOY–HEAT-RESISTANT CONDENSATION-DIFFUSION COATING»

*Studies of the formation of porosity at the boundary «of the ZhS26 heat-resistant alloy–a heat-resistant condensation-diffusion coating» – have been carried out. An ion-plasma heat-resistant condensation-diffusion coating of the NiCoCrAlY+AlNiY system (SDP-4+VSDP-16) with different thicknesses of the condensed layer made of SDP-4 alloy (19; 38 and 76 μm) with the same thickness of the layer of alloy VSDP-16 (17 μm). Part of the coated samples was subjected to vacuum thermal diffusion annealing according to standard technology.*

*Investigations of samples in the initial state and samples after vacuum annealing were carried out, their microstructures were shown, and the results of micro X-ray analysis (MRCA) were given.*

*It is shown that on samples of a heat-resistant alloy ZhS26 with a condensed coating SDP-4 with thicknesses of 19 and 38 μm in the vacuum annealing process at the boundary «of the heat-resistant alloy ZhS26–a heat-resistant condensation-diffusion coating» of the system SDP-4+VSDP-16 forms a pore chain. «On sample ZhS26 with a condensed coating SDP-4 76 μm thick, pores are not formed on the «alloy–coating» interface.*

**Keywords:** heat-resistant nickel alloy, ion-plasma condensation-diffusion coating, diffusion processes, Kirkendall effect, microstructure, scanning electron microscopy.

<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 авиационной промышленности для изготовления рабочих лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) применяются литейные никелевые жаропрочные сплавы, такие как ЖС6У, ЖС26, ЖС32, ВЖМ4 и т. д. [1–3]. Несмотря на высокие свойства этих сплавов по коррозионной стойкости и жаростойкости, для повышения ресурса на рабочую поверхность деталей ГТД наносятся защитные покрытия методом вакуумной плазменной технологии высоких энергий (ВПТВЭ), разработанной во ФГУП «ВИАМ» [4–8]. Для продления срока службы рабочих лопаток ГТД, выполненных из жаропрочных никелевых сплавов, работающих при температурах 1000–1100°C, на их рабочую поверхность наносят защитные ионно-плазменные жаростойкие конденсационно-диффузионные покрытия системы  $Ni(Co)CrAlY+AlNiY$ . Ионно-плазменные покрытия значительно повышают свойства по жаростойкости и коррозионной стойкости рабочих лопаток ГТД, при этом не снижают их механические свойства, такие как многоцикловая усталость и длительная прочность [9]. Свойства и структуры ионно-плазменных конденсационно-диффузионных покрытий хорошо описаны в работах ФГУП «ВИАМ» [10, 11]. В серийном производстве, на предприятиях газотурбостроения, ионно-плазменные жаростойкие и коррозионностойкие покрытия толщиной от 10 до 100 мкм наносят на ионно-плазменных установках (ИПУ) типа МАП (МАП-1, МАП-1М и МАП-2) [12]. Ионно-плазменное конденсационно-диффузионное жаростойкое покрытие системы  $NiCoCrAlY+AlNiY$  (СДП-4+ВСДП-16) применяется в качестве внутреннего металлического жаростойкого соединительного слоя теплозащитного покрытия (ТЗП) с внешним керамическим слоем на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, которое наносят на трактовую поверхность рабочих лопаток ГТД [13, 14]. Жаростойкий соединительный слой ТЗП предохраняет поверхность лопатки турбины от высокотемпературного окисления и разупрочнения, а также обеспечивает высокую работоспособность керамического слоя ТЗП при температурах >1100°C [15].

При разработке и применении ионно-плазменных жаростойких конденсационно-диффузионных покрытий одной из важнейших характеристик, определяющих их свойства, является соотношение толщины (мкм) покрытия внутреннего конденсированного слоя из никелевого сплава системы  $NiCoCrAlY$  к величине удельного привеса ( $г/м^2$ ) алюминиевого слоя из сплава системы  $AlNiY$  на единицу покрываемой поверхности. Соотношение толщины покрытия конденсированных слоев  $NiCoCrAl$  к слою  $AlNiY$  определяет конструкцию и тип защитного жаростойкого покрытия после проведения вакуумного термодиффузионного отжига и влияет на образование пористости на границе «жаропрочный сплав–жаростойкое покрытие». В свою очередь, при проведении вакуумного отжига глубина диффузионного слоя, нанесенного алюминиевого покрытия  $AlNiY$ , изменяться в зависимости от продолжительности выдержки при заданной температуре.

В данной работе показано, что при толщине конденсированного слоя 19 и 38 мкм из сплава СДП-4 и 17 мкм из сплава ВСДП-16 на поверхности жаропрочного сплава после вакуумного отжига формируется диффузионное алюминидное покрытие толщиной 20 и 40 мкм соответственно, легированное элементами сплава СДП-4, а на границе «сплав–покрытие» происходит формирование пористости. Причиной образования пористости на границе «сплав–покрытие» является нескомпенсированная диффузия никеля из жаропрочного сплава в покрытие (эффект Киркендалла), необходимая для формирования в покрытии  $\beta$ -фазы ( $NiAl$ ) при температуре вакуумного отжига, равной 1000°C, так как наличие Ni и Co в ограниченном по толщине слое сплава СДП-4 недостаточно для формирования фазы  $NiAl$  [16–18].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия» комплексной научной проблемы 17.3. «Многослойные

жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионно- 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») [19].

### Материалы и методы

Для определения причин возникновения пористости при формировании жаростойкого соединительного слоя на границе «жаропрочный сплав–жаростойкое конденсационно-диффузионное покрытие» выбран никелевый сплав марки ЖС26 и жаростойкое покрытие системы NiCoCrAlY+AlNiY (СДП-4+ВСДП16), которые широко используются в серийном производстве рабочих деталей ГТД. Из выбранного сплава марки ЖС26 изготовлены образцы цилиндрической формы  $\varnothing 8$  мм и длиной 40 мм. Перед нанесением жаростойкого покрытия поверхность образцов из жаропрочного сплава подвергали пескоструйной обработке электрокорундом с дальнейшим обдувом сжатым воздухом и промыванием в ультразвуковой ванне для более качественного удаления остатков твердых частиц абразивного материала ( $Al_2O_3$ ). После промывания в ультразвуковой ванне образцы измеряли штангенциркулем и взвешивали на аналитических весах, а затем закрепляли на оснастке и устанавливали в камеру напыления автоматизированной ионно-плазменной установки МАП-3. Перед нанесением первого конденсированного слоя из сплава СДП-4 поверхность образцов подвергали финишной очистке бомбардировкой их поверхности ионами сплава катода системы NiCoCrAlY в плазме вакуумно-дугового разряда по заданным параметрам процесса ионной очистки. По завершении процесса ионной очистки на поверхность образцов из сплава ЖС26 последовательно с различными временными интервалами наносили конденсированные слои из сплава СДП-4 толщиной: 19; 38 и 76 мкм. Для контроля нанесения толщины конденсированного покрытия СДП-4 все образцы повторно взвешивали на аналитических весах, после чего на все образцы в одном технологическом процессе наносили алюминиевое покрытие из сплава системы AlNiY с одинаковым удельным привесом  $\sim 47$  г/м<sup>2</sup>. После нанесения ионно-плазменных конденсированных слоев жаростойкого покрытия СДП-4+ВСДП-16 часть образцов с различной толщиной слоя СДП-4 (19; 38 и 76 мкм) и одинаковым алюминиевым слоем ВСДП-16 ( $\sim 17$  мкм) подвергали вакуумному отжигу в электропечи марки ВС-16-14 по стандартной технологии, разработанной во ФГУП «ВИАМ».

На всех этапах нанесения ионно-плазменных покрытий и проведения вакуумного термодиффузионного отжига образцов из сплава ЖС26 проводили гравиметрический контроль взвешиванием на аналитических весах фирмы OHAUS с точностью  $10^{-4}$  г.

После обработки провели пробоподготовку образцов из сплава ЖС26 с конденсированными покрытиями СДП-4 и ВСДП-16 в исходном и отожженном состояниях с запрессовкой в эпоксидную смолу.

Металлографию и распределение химического состава покрытия проводили на сканирующем растровом электронном микроскопе (РЭМ) Inspect F50 фирмы FEI (США) с использованием энергодисперсионного анализатора (EDS/ЭДА).

### Результаты и обсуждение

Металлографический анализ показал, что на образцах жаропрочного никелевого сплава ЖС26 с конденсированными слоями покрытия СДП-4 толщиной 19; 38 и 76 мкм и конденсированным слоем алюминидного покрытия ВСДП-16 с удельным привесом 47 г/м<sup>2</sup> наблюдается двухслойное покрытие с указанными толщинами покрытия СДП-4 и одинаковой толщиной алюминиевого слоя ВСДП-16 (17 мкм). При изучении микроструктуры образцов в конденсированных слоях покрытия СДП-4

толщиной 19 и 38 мкм обнаружены статические трещины, переходящие в слой из алюминиевого сплава ВСДП-16. На микроструктуре шлифа с конденсированным слоем покрытия из сплава СДП-4 толщиной 76 мкм статических трещин не наблюдалось. Микроструктуры образцов из сплава ЖС26 с конденсированным слоем из сплава СДП-4 и слоем алюминиевого покрытия ВСДП-16 с удельным привесом  $\sim 47$  г/м<sup>2</sup> после нанесения в установке МАП-3 представлены на рис. 1. Примеры микроструктур образцов со статическими трещинами в слое СДП-4 толщиной 19 и 38 мкм представлены на рис. 2.

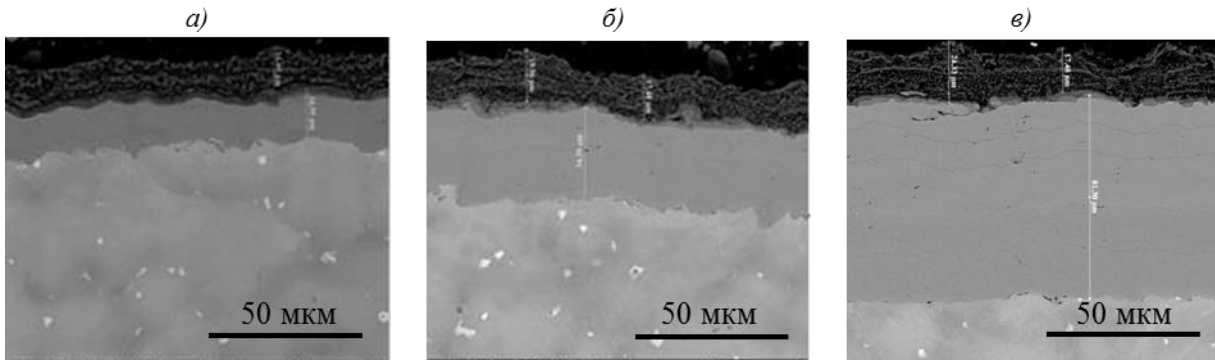


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 2000$ ) образцов из сплава ЖС26 с конденсированным слоем из сплава СДП-4 толщиной 19 (а), 38 (б) и 76 мкм (в) и слоем алюминиевого покрытия ВСДП-16 с удельным привесом  $\sim 47$  г/м<sup>2</sup> после нанесения в установке МАП-3

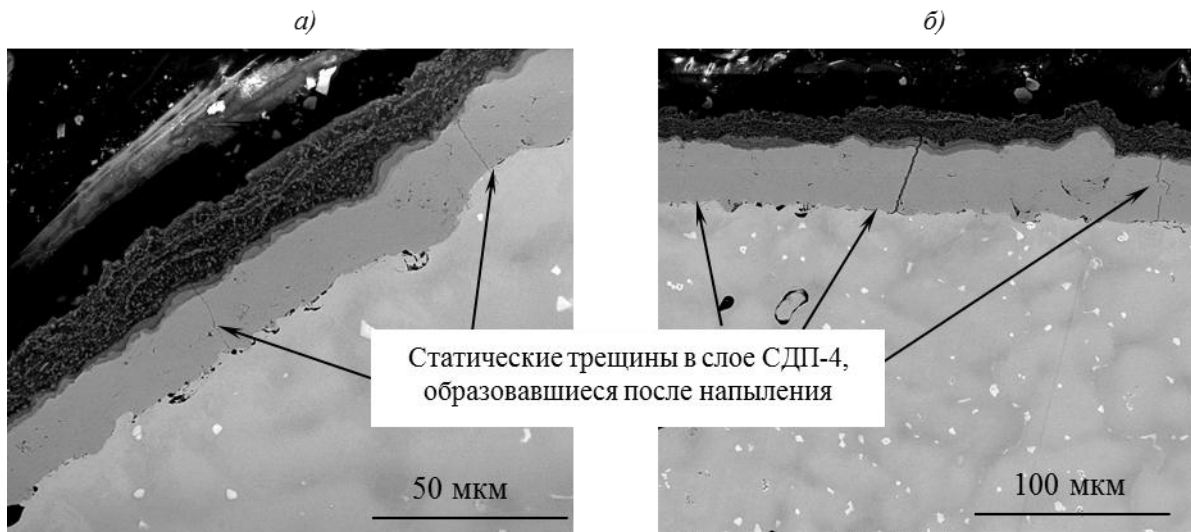


Рис. 2. Микроструктура (а –  $\times 2000$ ; б –  $\times 1000$ ) образцов из сплава ЖС26 с трещинами в конденсированном слое из сплава СДП-4 толщиной 19 (а) и 38 мкм (б) в исходном состоянии после нанесения в установке МАП-3

Напряженное состояние системы «жаропрочный сплав ЖС26–конденсированные слои покрытия СДП-4+ВСДП-16» в исходном состоянии подробно не исследовалось. Возможно, статические трещины образовались при проведении пробоподготовки. Однако можно предположить, что причиной образования статических трещин в конденсированных слоях толщиной до 40 мкм может являться наличие внутренних напряжений в системе «сплав–покрытие». При этом температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) покрытия СДП-4 в диапазоне температур от 400 до 800°С изменяется с  $15 \cdot 10^{-6}$  до  $20,6 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>, а для сплава ЖС26 в том же

диапазоне температур – с  $13,8 \cdot 10^{-6}$  до  $15,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . В процессе напыления образец из сплава ЖС26 с конденсированным покрытием СДП-4 нагревается до температур  $\sim 700^\circ\text{C}$ , и при охлаждении в слое покрытия СДП-4 формируются напряжения растяжения. По приведенным ранее данным, значения ТКЛР конденсированного слоя покрытия СДП-4 больше аналогичных значений для сплава ЖС26, что может быть причиной образования статических трещин. При этом следует отметить, что при увеличении конденсированного слоя покрытия СДП-4 до толщины 76 мкм, статические трещины не образуются, возможно, по причине увеличения прочности более толстого слоя покрытия. По данному вопросу в области изучения образования внутренних напряжений в слое конденсированного ионно-плазменного покрытия для системы «жаропрочный сплав–жаростойкое покрытие» в работе [20] приведена аналитическая модель для определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для рабочих лопаток авиационных турбин.

При исследовании микроструктур образцов из сплава ЖС26 после проведения вакуумного отжига (рис. 3, а, б) обнаружено, что на образцах с конденсированным слоем покрытия СДП-4 толщиной 19 и 38 мкм конструкция жаростойкого покрытия представляет собой легированное диффузионное покрытие и на границе «сплав–покрытие» образуется цепочка пор (эффект Киркендалла). Этот эффект более ярко проявляется при толщине конденсированного покрытия 38 мкм. На внешней зоне покрытия сформировался моноалюминид никеля NiAl ( $\beta$ -фаза), который содержит до 25% (по массе) Al и 15% (по массе) Cr. От поверхности покрытия к границе раздела «сплав–покрытие» содержание Al снижается. Хром в покрытии выделяется в виде мелкодисперсных включений с неоднородным распределением по толщине. На границе «сплав–покрытие», в переходной диффузионной зоне покрытия, хром, вытесненный из  $\beta$ -фазы, присутствует в виде тугоплавких карбидов.

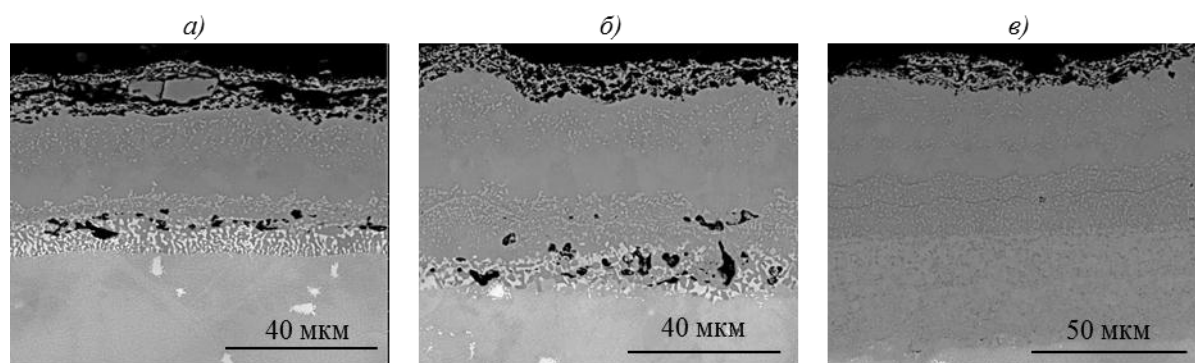


Рис. 3. Микроструктура (а, б –  $\times 3000$ ; в –  $\times 2500$ ) образцов из сплава ЖС26 с конденсированным слоем из сплава СДП-4 толщиной 19 (а), 38 (б) и 76 мкм (в) и слоем алюминиевого покрытия ВСДП-16 с удельным привесом  $47 \text{ г/м}^2$  после нанесения в установке МАП-3 и проведения вакуумного термодиффузионного отжига

На образце со слоем конденсированного никелевого покрытия СДП-4 толщиной 76 мкм конструкция жаростойкого слоя представляет собой конденсационно-диффузионное трехслойное покрытие и на границе «сплав–покрытие» пористости не наблюдается. Типичная структура конденсационно-диффузионного покрытия показана на рис. 3, в. Конденсационно-диффузионное покрытие системы NiCoCrAlY+AlNiY, полученное ионно-плазменным методом на автоматизированной установке МАП-3

при высоких энергиях частиц, после проведения стабилизирующего вакуумного отжига имеет мелкозернистую структуру. После проведения вакуумного отжига основной фазовой составляющей во внешнем слое конденсационно-диффузионного покрытия является моноалюминид никеля NiAl ( $\beta$ -фаза) с включениями чистого хрома ( $\alpha$ -Cr). Средняя часть покрытия состоит из сплава системы NiCoCrAlY, обогащенного хромом (до 32% (по массе)) за счет его вытеснения из внешнего слоя покрытия и алюминием (до 15% (по массе)). На границе «сплав–покрытие» наблюдается зона диффузионного взаимодействия, в которой присутствуют карбиды на основе хрома и тугоплавких элементов (W, Nb, Mo и т. д.), содержащихся в никелевом жаропрочном сплаве ЖС26.

Распределение основных элементов по толщине слоев покрытия очень неравномерное, при котором наблюдается градиент концентраций алюминия по толщине – от поверхности покрытия к границе с основой. Причиной неравномерного распределения алюминия в покрытии является изменение фазового состава по его толщине. Внешний слой сформированного жаростойкого покрытия представляет собой  $\beta$ -фазу с содержанием хрома 3% (по массе) в пределах его растворимости в  $\beta$ -фазе с выделениями  $\alpha$ -Cr. Распределение хрома в покрытии имеет более сложный характер – при этом максимальная концентрация хрома (до 32% (по массе)) наблюдается в среднем слое покрытия и снижается до 20–25% (по массе) в нижнем слое покрытия, который примыкает к границе жаропрочного сплава.

Микроструктура образцов из сплава ЖС26 с конденсированными слоями из сплава СДП-4 и слоем алюминиевого покрытия ВСДП-16 с удельным привесом 47 г/м<sup>2</sup> после нанесения в установке МАП-3 и проведения вакуумного отжига представлена на рис. 3. Видно, что пористость (эффект Киркендалла) образуется на образцах с толщиной слоя 19 и 38 мкм сплава СДП-4 (рис. 3, а, б). На образце с толщиной слоя 76 мкм сплава СДП-4 пористость на границе «сплав–покрытие» не образуется.

Металлографический анализ микроструктуры образцов из сплава ЖС26 с покрытиями показал, что при нанесении конденсированного слоя покрытия СДП-4 с толщиной до 40 мкм в исходном состоянии образуются статические трещины, а при проведении вакуумной термической обработки на границе раздела «сплав–покрытие» образуются цепочки пор (эффект Киркендалла), которые являются основной причиной образования дефектов в рабочих лопатках ТВД в случае применения покрытия СДП-4 с толщиной до 40 мкм и удельным привесом от алюминиевого сплава 47 г/м<sup>2</sup>. При нанесении конденсированного покрытия толщиной 76 мкм исключается образование статических трещин в слое, а также цепочки пор на границе «сплав–покрытие». В результате модельного эксперимента показано, что для получения жаростойкого соединительного слоя в виде конденсационно-диффузионного покрытия необходимо соблюдать соотношение толщин конденсированного слоя СДП-4 и внешнего алюминиевого слоя на основе сплава ВСДП-16, что позволит получить характерную структуру такого покрытия и исключить дефекты легированного диффузионного покрытия в виде образования пористости на границе раздела «жаростойкий сплав–жаростойкое покрытие».

Результаты микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) исследуемых образцов из сплава ЖС26 с покрытиями в исходном состоянии и после вакуумного отжига, а также состав поверхностного слоя жаропрочного сплава приведены в таблице.

При толщине слоя 19 мкм покрытия СДП-4 в исходном состоянии содержание Al составляет 51,06% (по массе) при содержании 32,41% (по массе) Ni. После вакуумного отжига содержание Al и Ni соответственно составляет 24,8 и 53,92% (по массе), что соответствует стехиометрическому составу для  $\beta$ -фазы (NiAl). Очевидно, что недостаток никеля в покрытии компенсируется за счет диффузии его из сплава в покрытие. При этом сравнение состава поверхностного слоя жаропрочного сплава в исходном состоянии и

после вакуумного отжига показывает, что содержание никеля в этом слое уменьшается, а содержание Al и Cr незначительно возрастает. В целом диффузионный поток никеля из жаропрочного сплава в покрытие не скомпенсирован, что и является причиной образования пористости на границе «сплав–покрытие». Аналогичная картина наблюдается и при толщине слоя 38 мкм сплава СДП-4. При увеличении толщины слоя сплава СДП-4 в покрытии до 76 мкм на границе «сплав–покрытие» пористость отсутствует, что свидетельствует о том, что диффузионные потоки элементов покрытия в жаропрочном сплаве практически сравнимы с диффузией элементов из жаропрочного сплава в покрытие.

**Средний химический состав покрытия СДП-4+ВСДП-16 и поверхностного слоя сплава ЖС26 в исходном состоянии и после вакуумного отжига**

Зона исследования	Среднее содержание основных легирующих элементов, % (по массе)								
	Al	Ni	Cr	Co	Ti	W	Nb	Mo	Fe
Покрытие СДП-4 с толщиной слоя 19 мкм									
Покрытие СДП-4+ВСДП-16:									
– в исходном состоянии*	51,06	32,41	12,24	4,29	–	–	–	–	–
– после вакуумного отжига	24,80	53,92	14,45	6,82	–	–	–	–	–
Поверхностный слой сплава ЖС26:									
– в исходном состоянии	5,56	58,60	9,80	11,19	2,32	10,07	0,63	1,05	0,77
– после вакуумного отжига	9,25	54,26	12,51	11,36	2,45	7,99	1,05	1,14	–
Покрытие СДП-4 с толщиной слоя 38 мкм									
Покрытие СДП-4+ВСДП-16:									
– в исходном состоянии	40,29	38,62	15,70	5,40	–	–	–	–	–
– после вакуумного отжига	21,36	53,84	17,30	7,50	–	–	–	–	–
Поверхностный слой сплава ЖС26:									
– в исходном состоянии	5,60	60,22	9,27	11,38	2,45	8,71	0,68	1,10	0,59
– после вакуумного отжига	7,21	57,12	12,11	11,14	2,39	7,65	–	1,69	0,68
Покрытие СДП-4 с толщиной слоя 76 мкм									
Покрытие СДП-4+ВСДП-16:									
– в исходном состоянии	28,70	45,34	19,32	6,65	–	–	–	–	–
– после вакуумного отжига	16,18	53,35	22,22	8,25	–	–	–	–	–
Поверхностный слой сплава ЖС26:									
– в исходном состоянии	4,94	57,11	9,01	10,83	2,68	12,45	0,94	1,09	0,96
– после вакуумного отжига	5,97	61,19	10,15	11,32	2,43	8,14	0,81	–	–

\* Здесь и в остальных пунктах таблицы – средний состав по двухслойному покрытию.

**Заключения**

Анализ результатов исследования образцов из сплава ЖС26 с конденсированными слоями покрытия СДП-4 с толщиной 19; 38 и 76 мкм и конденсированным слоем алюминиевого покрытия с удельным привесом 47 г/м<sup>2</sup> как в исходном состоянии, так и после проведения вакуумного термодиффузионного отжига, показал, что для толстого слоя из сплава СДП-4 при привесе алюминиевого слоя ВСДП-16, равном 47 г/м<sup>2</sup> (толщина 17 мкм), исключается образование дефектов в структуре покрытия в виде статических трещин в слое из сплава СДП-4 и образование пористости на границе «сплав–покрытие».

На образцах с конденсированным слоем покрытия СДП-4 с толщиной 19 и 38 мкм и конденсированным слоем алюминиевого покрытия ВСДП-16 с толщиной 17 мкм в исходном состоянии в слое СДП-4 имеют место остаточные напряжения растяжения, приводящие к образованию статических трещины за счет разницы значений температурных коэффициентов линейного расширения покрытия из сплава СДП-4 и сплава ЖС26. При проведении вакуумного термодиффузионного отжига на границе «сплав–покрытие» образуется цепочка пор (эффект Киркендалла) за счет протекания диффузионных процессов, при которых возникает нескомпенсированный диффузионный поток никеля из сплава в покрытие для формирования исходной структуры β-фазы (NiAl).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок // Крылья Родины. 2010. №4. С. 31–33.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
3. 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.
4. Мубояджян С.А., Каблов Е.Н., Будиновский С.А. Вакуумно-плазменная технология получения защитных покрытий из сложнолегированных сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 1995. №2. С. 15–18.
5. Коломьцев П.Г. Газовая коррозия и прочность никелевых сплавов. М.: Металлургия, 1984. 215 с.
6. Кашин Д.С., Стехов П.А. Разработка комплексных жаростойких покрытий для деталей из естественно-композитного материала на основе ниобия. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №6 (54). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-4-4.
7. Способ обработки поверхности металлического изделия: пат. 2368701 Рос. Федерация; опубл. 27.09.09.
8. Способ нанесения комбинированного жаростойкого покрытия: пат. 2402633 Рос. Федерация; опубл. 27.10.10.
9. Будиновский С.А., Мубояджян С.А. Эффективность двухстадийной ионно-плазменной технологии получения легированных диффузионных алюминидных покрытий на жаропрочных никелевых сплавах // Металловедение и термическая обработка металлов. 2003. №5. С. 27–32.
10. Лощинин Ю.В., Будиновский С.А., Размахов М.Г. Теплопроводность теплозащитных легированных оксидами РЗМ покрытий  $ZrO_2-Y_2O_3$ , полученных магнетронным нанесением // Авиационные материалы и технологии. 2018. №3 (52). С. 42–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-42-49.
11. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-22-26.
12. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Ионно-плазменная технология: перспективные процессы, покрытия, оборудование // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 39–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-39-54.
13. Чубаров Д.А., Матвеев П.В. Новые керамические материалы для теплозащитных покрытий рабочих лопаток ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 43–46.
14. Будиновский С.А., Смирнов А.А., Матвеев П.В., Чубаров Д.А. Разработка теплозащитных покрытий для рабочих и сопловых лопаток турбины из жаропрочных и интерметаллидных сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №4. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-5-5.
15. Смирнов А.А., Будиновский С.А., Матвеев П.В., Чубаров Д.А. Разработка теплозащитных покрытий для лопаток ТВД из никелевых монокристаллических сплавов ВЖМ4, ВЖМ5У // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №1. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-3-3.
16. Мокров А.П., Жарков В.М. Взаимная диффузия и эффект Киркендалла в системе ниобий–ванадий // Диффузионные процессы в металлах. Тула: ТПИ, 1974. Вып. 2. С. 39–49.
17. Гегузин Я.Е. Очерки о диффузии в кристаллах. М: Наука, 1974. 254 с.
18. Криштал М.А., Выбойщик М.А., Левин Д.М. Образование дислокаций в диффузионной зоне и диффузия по дислокациям // Диффузионные процессы в металлах. Тула: ТПИ, 1973. С. 184–210.
19. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
20. 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. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP2. С. 26–37.