

УДК 669.018.44

А.А. Смирнов¹, С.А. Будиновский¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БАРЬЕРНОГО СЛОЯ НА ЖАРСТОЙКОСТЬ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЛОПАТОК ТВД ИЗ СПЛАВА ЖС32

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-2-2

Рассмотрено влияние барьерных нитридных и карбидных слоев на жаростойкость композиций из жаропрочного сплава ЖС32 с жаростойкими покрытиями. Проведены исследования микроструктуры барьерных слоев в структуре покрытий в исходном состоянии и после испытаний на жаростойкость при температурах 1150 и 1200°C на базах 500 и 100 ч соответственно. Изучена кинетика изменения состава барьерных слоев, а также их влияние на защитные свойства покрытия. Установлено, что использование в структуре защитного жаростойкого покрытия состава Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf+Al–Ni–Y нитридного барьера повышает жаростойкость композиции «сплав ЖС32–покрытие».

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 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») [1].

Ключевые слова: жаростойкие покрытия, ионно-плазменная технология, жаропрочные никелевые сплавы, вторичная реакционная зона, топологически плотноупакованные фазы.

The effect of the nitride and carbide barrier layers on heat resistance of the compositions of superalloy ZhS32 with heat-resistant coatings was studied. Investigations of the barrier layer microstructure in the coating structure in original form and after heat resistance test at temperatures 1150 and 1200°C on the basis of 500 and 100 hours accordingly were carried out. Kinetics change of the barrier layers and their influence on the protective properties of the coating was studied. It has been found that the use of the nitride barrier in the structure of heat-resistant protective coating composition Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf+Al–Ni–Y improves the heat resistance of composition «ZhS32–coating».

The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 17.3. «Multilayer heat-resisting and heat-protective coatings, nanostructural strengthening erosion, corrosion, wear-resistant and antifretting coatings for protection of hot section parts and GTE/GTU compressor» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: heat-resistant coatings, ion-plasma technology, high-temperature nickel alloys, secondary reaction zone, topologically close-packed phases.

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

Жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС), легированные рением (сплавы последнего поколения легированы рением и рутением), в настоящее время являются единственными материалами для изготовления рабочих лопаток турбины газотурбинных

двигателей [2–6]. Однако в промышленности продолжают широко применять жаропрочный сплав ЖС32, разработанный ВИАМ более 20 лет назад для лопаток турбин высокого давления в ГТД различного назначения. Для обеспечения длительного ресурса лопаток из сплава ЖС32 в условиях высоких температур с кратковременными забросами до 1200°C необходима и применяется защита жаростойкими покрытиями типа СДП-2+ВСДП-16, ВСДП-9+ВСДП-18 и их аналогами [7–12]. В условиях высоких температур под алюминидными покрытиями на сплавах, легированных рением, формируется так называемая вторичная реакционная зона. Данное структурное образование состоит из пластинчатых топологически плотноупакованных (ТПУ) фаз, наличие которых приводит к деградации структуры и последующему разупрочнению поверхностного слоя сплава [13, 14]. Для снижения интенсивности процесса образования ТПУ фаз предложено использовать в конструкции покрытия внутренний барьерный слой на границе раздела «сплав–покрытие» для торможения диффузионного взаимодействия жаропрочного сплава с жаростойким покрытием [15, 16].

Цель данной работы – повышение служебных характеристик жаростойких конденсационно-диффузионных покрытий для защиты лопаток турбин из сплава ЖС32.

Материалы и методы

Исследования проведены на цилиндрических монокристаллических образцах из жаропрочного никелевого сплава ЖС32 с кристаллографической ориентацией $\langle 001 \rangle$.

В качестве покрытий использовали жаростойкие сплавы, применяемые для изготовления ионно-плазменных покрытий, СДП-41 (Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf), ВСДП-9 (Ni–Al–Cr–Ta–Y) и ВСДП-16 (Al–Ni–Y). Покрытия, исследованные в работе (табл. 1), получены на промышленной ионно-плазменной установке МАП-2 с автоматизированной системой управления технологическим процессом.

Таблица 1

Жаростойкие покрытия

Покрытие	Толщина*, мкм
СДП-41 (65 мкм)+ВСДП-16 (50 г/м ²)	80 (без барьерного слоя)
ВСДП-9 (65 мкм)+ВСДП-16 (50 г/м ²)	80 (без барьерного слоя)
[MeN1+СДП-41] (70 мкм)+ВСДП-16 (50 г/м ²)	90/10
[MeN2+ВСДП-9] (70 мкм)+ВСДП-16 (50 г/м ²)	85/12
[MeC1+СДП-41] (70 мкм)+ВСДП-16 (50 г/м ²)	80/12
[MeC2+ВСДП-9] (65 мкм)+ВСДП-16 (50 г/м ²)	90/14

* Толщина покрытия: в числителе – общая, в знаменателе – барьерного слоя.

Композиционные барьерные слои [СДП-41+N], [ВСДП-9+N], [СДП-41+C₂H₂] и [ВСДП-9+C₂H₂] (далее – MeN1, MeN2, MeC1 и MeC2 соответственно) формировали при испарении в вакуумном дуговом разряде катодов из сплавов СДП-41 и ВСДП-9. Процесс проводили при подаче в рабочую камеру установки инертных газов (ацетилена или азота) при давлении 0,03–0,1 Па. После формирования барьерного слоя заданной толщины подачу газа прекращали, и процесс нанесения покрытия продолжали в вакууме. После напыления покрытий проводили высокотемпературный вакуумный отжиг (при 1050°C, 3 ч) для окончательного формирования фазового состава покрытия и релаксации напряжений. После каждого технологического процесса нанесения покрытия (слоя) и отжига проводили осмотр образцов на наличие сколов или частичного отслоения металлического слоя защитного покрытия и взвешивание на электронных весах (с точностью ±0,0001 г) для фиксации привеса и толщины полученного слоя.

Исследования изотермической жаростойкости проводили в камерной электропечи Nabertherm в закрытых керамических тиглях в спокойной атмосфере печи (на воздухе) при температурах 1150 и 1200°C на базе 500 и 100 ч соответственно по ГОСТ 6130.

Критерием оценки жаростойкости покрытий являлось среднее арифметическое значение изменения массы трех образцов с покрытием одного типа по сравнению с начальной, отнесенное к исходной площади поверхности образца (удельное изменение массы, г/м^2) в процессе испытаний.

Микроструктуры композиций «сплав–покрытие» до и после испытаний на изотермическую жаростойкость исследовали на растровом электронном микроскопе FEI Inspect f50.

Фазовый анализ образцов с покрытиями после испытаний на жаростойкость выполнен на дифрактометре D/MAX-2500 (фирма Rigaku) с монокроматическим $\text{Cu } K_\alpha$ -излучением. Угловой диапазон сканирования в интервале углов 2θ : 20–80 град. Рабочий режим дифрактометра: напряжение 40 кВ, ток 200 мА, продолжительность экспозиции 1,5 с (на точку). Расшифровка дифрактограмм проведена с помощью специализированной программы Jade5 и базы данных PDF2.

Характеристики длительной прочности определяли на установке ZST2/3-ВИЭТ при 1200°C на базе испытаний до 500 ч в соответствии с требованиями ГОСТ 10145, а характеристики усталости – на испытательной машине МВИ-611М при 900°C на базе испытаний $2 \cdot 10^7$ циклов при симметричном знакопеременном цикле нагружения по ГОСТ 25.502.

Результаты

Результаты металлографических исследований образцов из сплава ЖС32 с покрытиями в исходном состоянии и после вакуумного отжига приведены на рис. 1 и 2. Покрытия ВСДП-9+ВСДП-16 и СДП-41+ВСДП-16 (рис. 1, а, б) имеют характерное двухзонное строение с внешним (верхним) слоем на основе β -фазы (NiAl), обеспечивающей защиту сплава от окисления. В покрытиях [MeN1+СДП-41]+ВСДП-16 и [MeN2+ВСДП-9]+ВСДП-16 дополнительно присутствует композиционный барьерный слой толщиной 10–15 мкм (рис. 1, в, г и 2, а, б). Барьерные слои, полученные плазмохимическим методом, из никелевых сплавов СДП-41 и ВСДП-9 представляют собой $(\gamma+\gamma')$ -матрицу на основе интерметаллида Ni_3Al и твердого раствора никеля, в которой в зависимости от используемого газа содержатся соответствующие частицы карбидов и нитридов. Нитридный барьер представляет собой плотные черные «нити» нитридов алюминия, хрома и тантала в структуре $(\gamma+\gamma')$ -жаростойкого слоя.

Покрытия [MeC1+СДП-41]+ВСДП-16 и [MeC2+ВСДП-9]+ВСДП-16 имеют в своей структуре композиционный барьерный слой толщиной 10–15 мкм (рис. 1, д, е и 2, в, г, который представляет собой равномерно распределенные карбиды хрома в структуре $(\gamma+\gamma')$ -жаростойкого слоя. Применение подобного барьера в конденсационно-диффузионных покрытиях известно и изучено в работах [17–19].

В данных покрытиях функция барьерного слоя заключается в торможении процессов встречной диффузии тугоплавких легирующих элементов из сплава подложки в жаростойкое защитное покрытие, нарушающей сплошность защитной оксидной пленки на поверхности покрытия вследствие образования летучих оксидов, и диффузии алюминия и хрома как из покрытия в подложку (так как в покрытии гораздо больше алюминия), так и к поверхности защитного слоя для формирования оксидной пленки.

Графики удельного изменения массы образцов из сплава ЖС32 с покрытиями и без них в зависимости от продолжительности испытания на изотермическую жаростойкость при температурах 1150 и 1200°C на базе 500 и 100 ч соответственно приведены на рис. 3. По результатам испытаний наименьшим удельным уносом массы характеризуется покрытие с нитридным барьером (рис. 2, кривая 3) [MeN1+СДП-41] (70 мкм)+ВСДП-16 (50 г/м^2). Образцы с данным покрытием после испытаний в течение 500 ч при 1150°C

имеют привес массы ($3,3 \text{ г/м}^2$), а при 1200°C через 100 ч – наименьший по сравнению с другими покрытиями удельный унос массы (25 г/м^2).

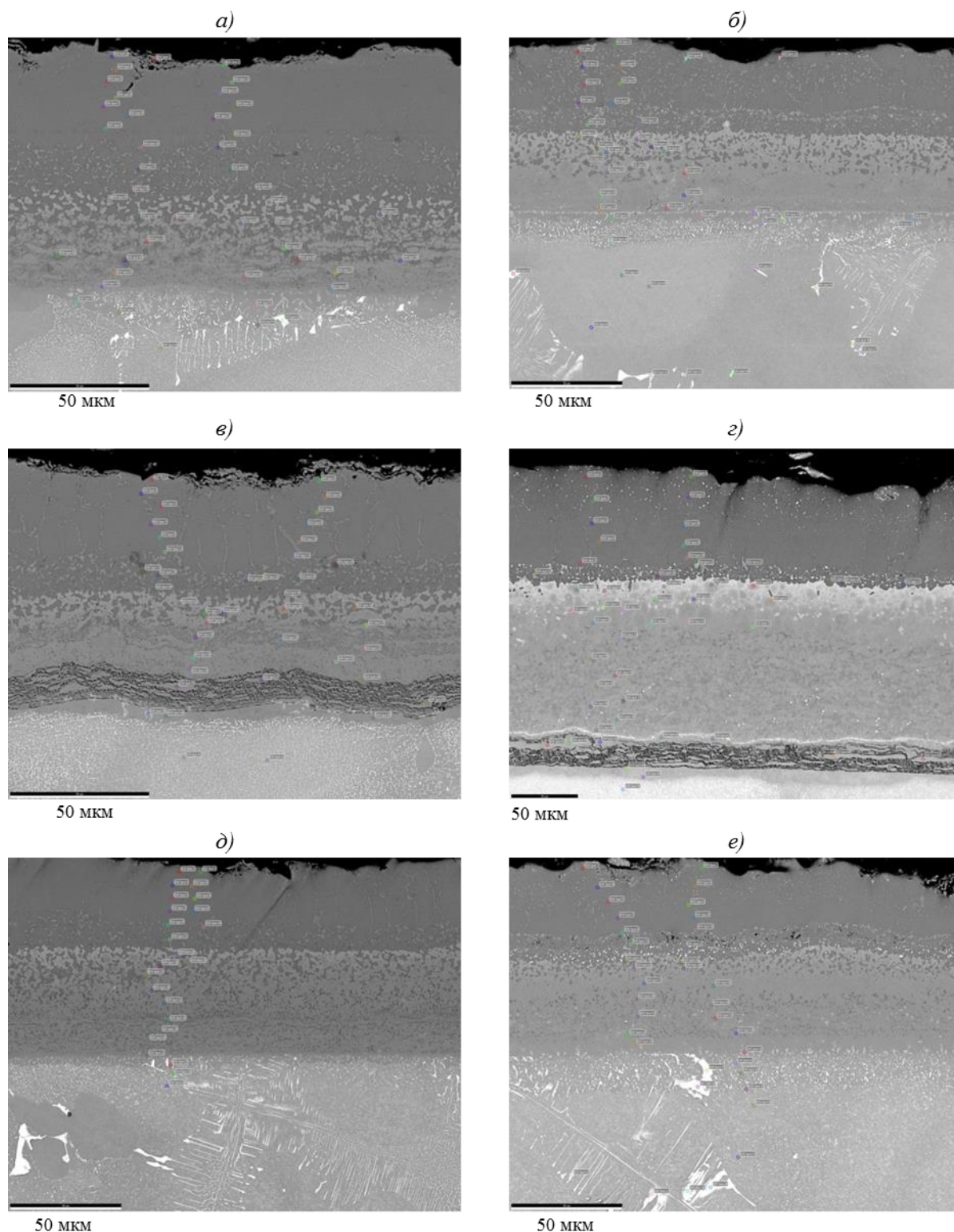


Рис. 1. Микроструктуры образцов из сплава ЖС32 с жаростойкими покрытиями ВСДП-9+ВСДП-16 (а), СДП-41+ВСДП-16 (б), [MeN2+ВСДП-9]+ВСДП-16 (в), [MeN1+СДП-41]+ВСДП-16 (г), [MeС2+ВСДП-9]+ВСДП-16 (д) и [MeС1+СДП-41]+ВСДП-16 (е) после вакуумного отжига

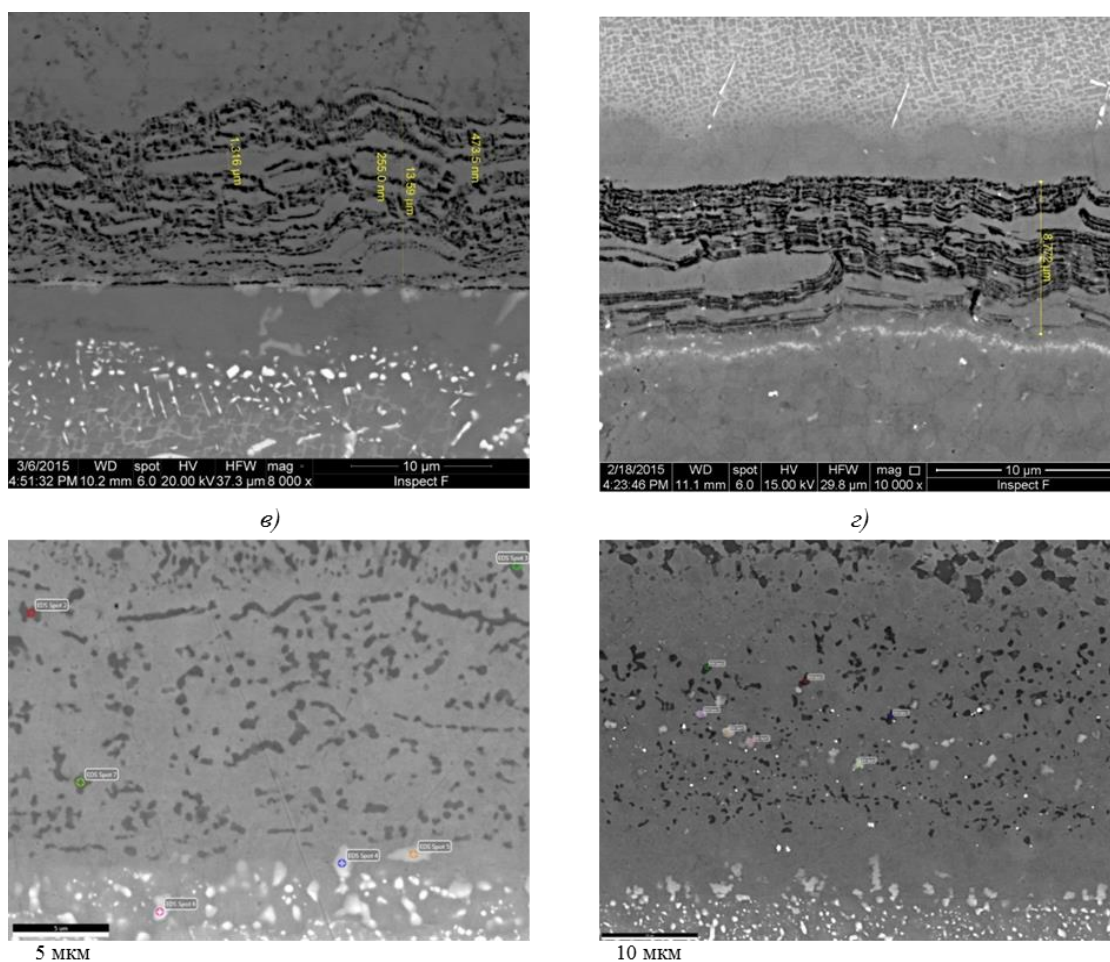


Рис. 2. Микроструктуры образцов (барьерные слои) из сплава ЖС32 с жаростойкими покрытиями [MeN2+ВСДП-9]+ВСДП-16 (а), [MeN1+СДП-41]+ВСДП-16 (б), [MeС2+ВСДП-9]+ВСДП-16 (в) и [MeС1+СДП-41]+ВСДП-16 (г) после вакуумного отжига

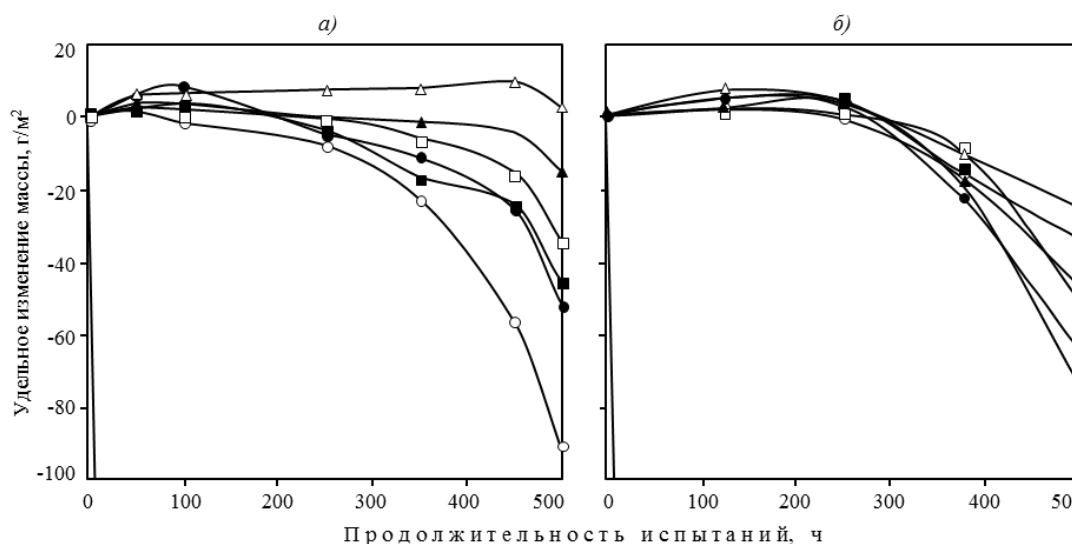








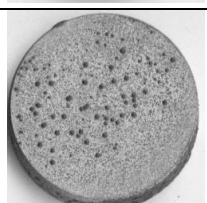


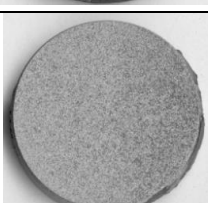
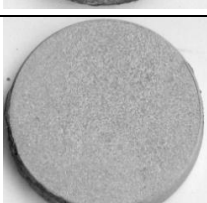
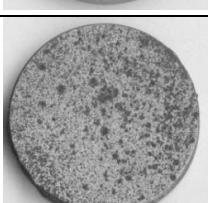


Рис. 3. Удельное изменение массы образцов из сплава ЖС32 без покрытия (—) и с жаростойкими покрытиями СДП-41+ВСДП-16 (■), ВСДП-9+ВСДП-16 (□), [MeN1+СДП-41]+ВСДП-16 (△), [MeN2+ВСДП-9]+ВСДП-16 (○), [MeС1+СДП-41]+ВСДП-16 (●) и [MeС2+ВСДП-9]+ВСДП-16 (▲) после изотермической выдержки при 1150°С на базе 500 ч (а) и 1200°С на базе 100 ч (б)

Внешний вид поверхности образцов из сплава ЖС32 с защитными жаростойкими слоями и без них после испытаний на жаростойкость представлен в табл. 2.

Таблица 2

Внешний вид поверхности образцов из сплава ЖС32 с жаростойкими покрытиями и без них после высокотемпературных испытаний

Покрытие	После испытаний по режиму	
	1150°C, 500 ч	1200°C, 100 ч
Без покрытия		
СДП-41+ВСДП-16		
ВСДП-9+ВСДП-16		
[MeN1+СДП-41]+ВСДП-16		
[MeN2+ВСДП-9]+ВСДП-16		
[MeC1+СДП-41]+ВСДП-16		
[MeC2+ВСДП-9]+ВСДП-16		

Образцы с наибольшим уносом массы [MeN2+ВСДП-9]+ВСДП-16 и [MeC2+ВСДП-9]+ВСДП-16 характеризуются максимальным коррозионным разрушением поверхности в результате длительного воздействия высокой температуры.

Микроструктура образцов из сплава ЖС32 с жаростойкими покрытиями после испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1150°C в течение 500 ч приведена на рис. 4 и 5.

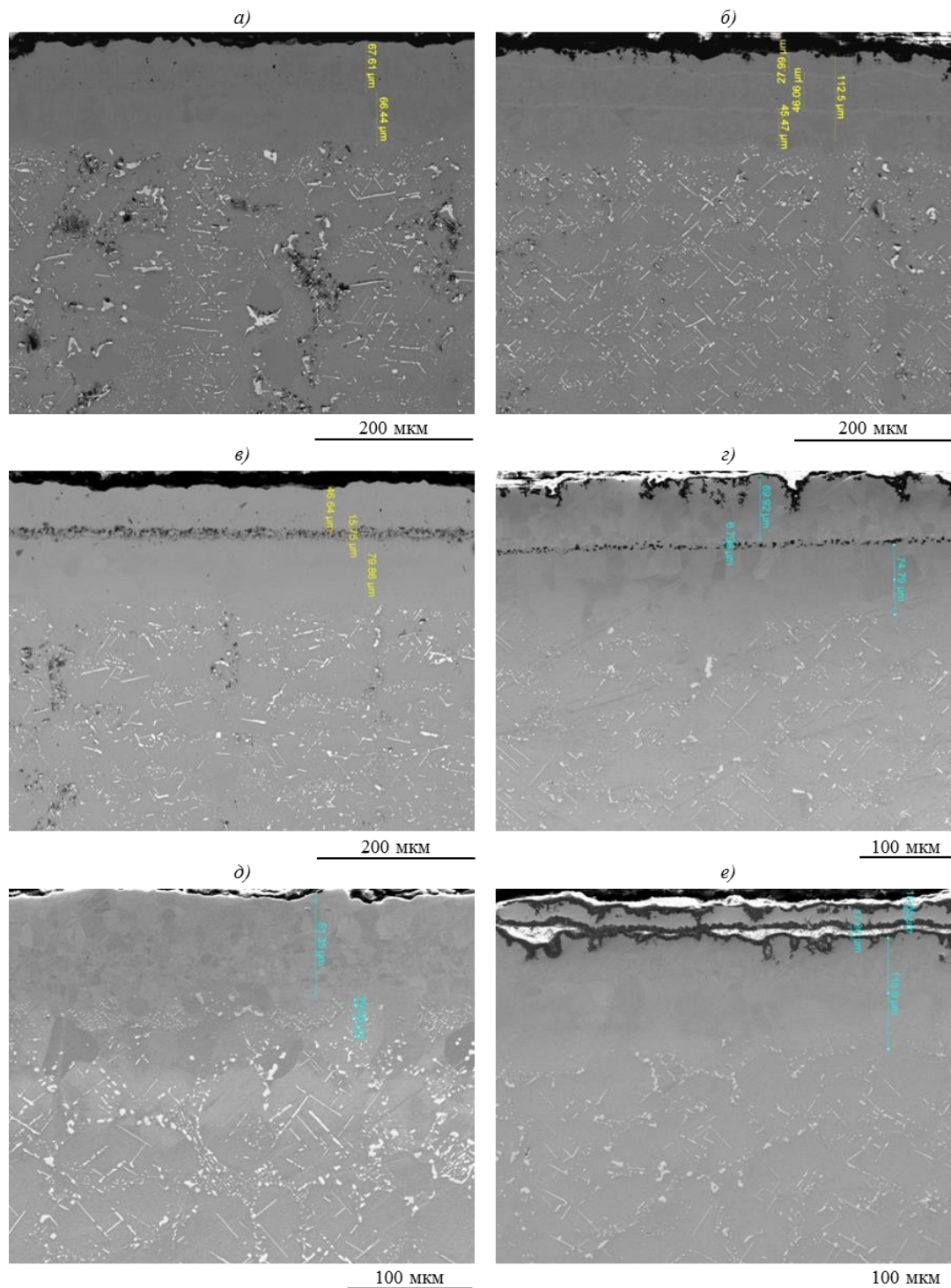


Рис. 4. Микроструктура образцов из сплава ЖС32 с жаростойкими покрытиями ВСДП-9+ВСДП-16 (а), СДП-41+ВСДП-16 (б), [MeN2+ВСДП-9]+ВСДП-16 (в); [MeN1+СДП-41]+ВСДП-16 (г), [MeC2+ВСДП-9]+ВСДП-16 (д) и [MeC1+СДП-41]+ВСДП-16 (е) после испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1150°C в течение 500 ч

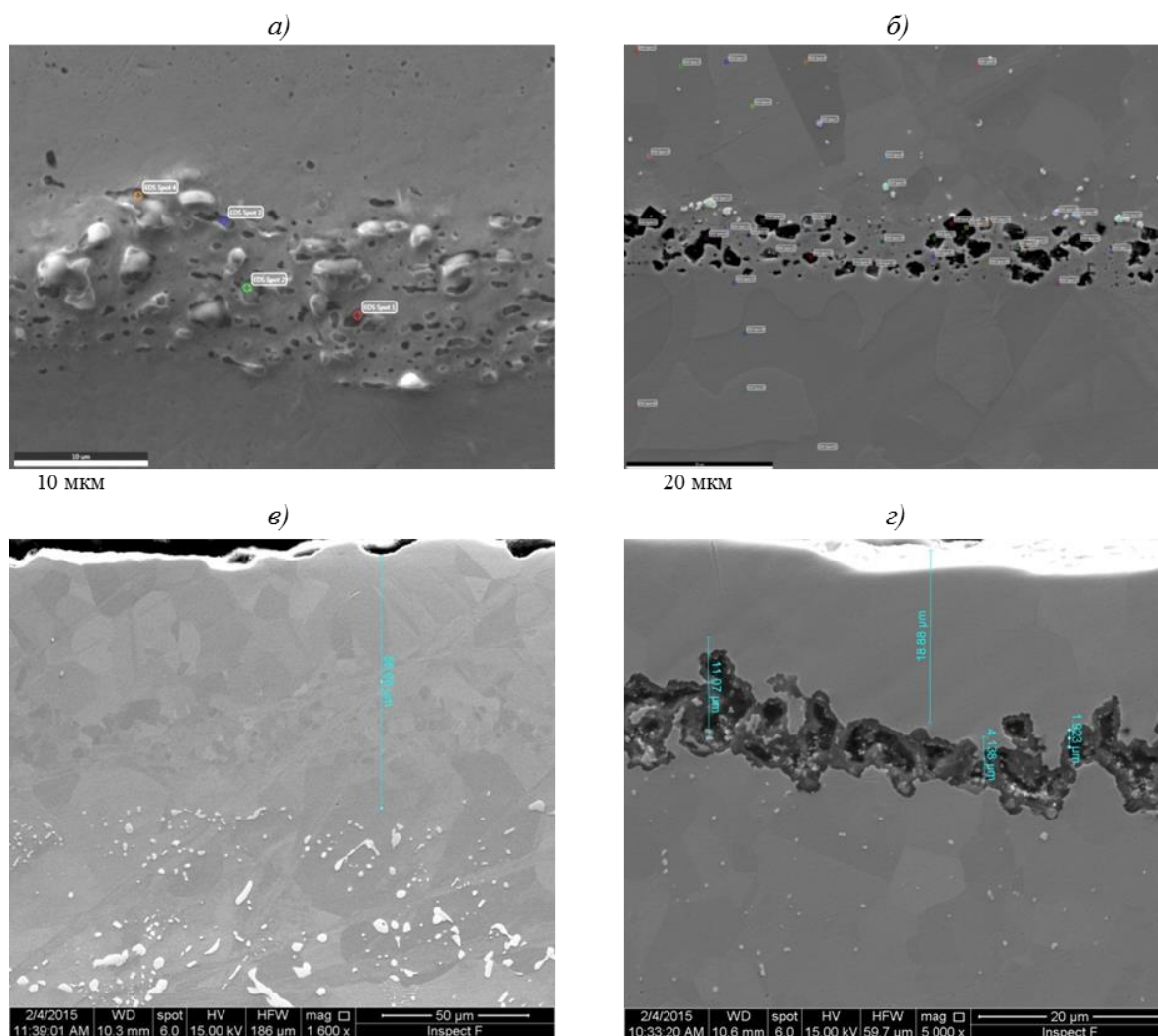


Рис. 5. Микроструктура образцов (барьерные слои) из сплава ЖС32 с жаростойкими покрытиями [MeN2++BCDP-9]+BCDP-16 (а); [MeN1+CDP-41]+BCDP-16 (б), [MeC2+BCDP-9]+BCDP-16 (в) и [MeC1+CDP-41]+BCDP-16 (г) после испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1150°C в течение 500 ч

После высокотемпературной выдержки покрытия претерпевают значительные изменения, которые определяются диффузией алюминия и хрома внутри покрытия. В структуре всех покрытий можно выделить следующие зоны: внешний слой – расходное защитное покрытие; средняя зона – зона диффузионного взаимодействия покрытия и сплава основы; внутренняя зона – вторичная реакционная зона, содержащая выделения ТПУ фаз различной формы. Толщина образующихся зон взаимодействия и доля выделяющихся ТПУ фаз определяются конструкцией покрытия. Покрытия без барьерных слоев практически утратили многослойную структуру. Под ними на небольшой глубине сформировалась зона с ТПУ фазами. Наименьшие изменения в структуре и по толщине защитного слоя имеет сплав с покрытиями, содержащими барьерные слои на основе нитридов (рис. 4, в, г). Выделения ТПУ фаз под покрытием [MeN1+CDP-41]+BCDP-16 практически отсутствуют по сравнению с покрытиями без барьерных слоев и с барьерами в составе покрытия BCDP-9+BCDP-16. Линейные размеры образующихся ТПУ фаз также меньше под покрытием с нитридным барьером. Топологически плотноупакованные фазы с большими линейными размерами могут являться

концентраторами напряжений и центрами зарождения трещин при эксплуатации жаропрочных сплавов с покрытиями [17]. Покрытия с нитридными барьерами полностью сохранили защитные свойства: толщина защитного жаростойкого слоя после испытаний (без учета толщины барьера) составила ~50 мкм (в исходном виде 75 мкм) – для покрытия [MeN₂+ВСДП-9]+ВСДП-16, 70 мкм (в исходном виде 80 мкм) – для [MeN₁+СДП-41]+ВСДП-16. В исходном виде во всех покрытиях во внешнем слое (темная зона) содержание алюминия составляет 21–26% (по массе), хрома 4–7% (по массе). После изотермической выдержки в покрытиях с нитридным барьером при температуре 1150°C в течение 500 ч содержание алюминия составляет 9–10% (по массе), хрома 3–4% (по массе).

Покрытия с карбидными барьерными слоями существенно отличаются по микроструктуре. При напылении сплава ВСДП-9, содержащего небольшое количество карбидообразующих элементов (до 10% (по массе) хрома, 1% (по массе) тантала), формирования эффективного композиционного карбидного барьерного слоя не произошло, поэтому после испытаний структуры покрытий ВСДП-9+ВСДП-16 и [MeC₂+ВСДП-9]+ВСДП-16 однотипны. Сплав СДП-41 содержит до 12% (по массе) хрома и легирован гафнием, танталом и рением. Это позволило сформировать противодиффузионный барьер на границе «сплав–покрытие» и снизить интенсивность образования вторичной реакционной зоны. Однако жаростойкость самого барьерного слоя, содержащего карбиды металлов, недостаточна при температуре испытаний, что приводит к окислению барьерного слоя и отслоению жаростойкого покрытия (рис. 4, *e* и 5, *z*).

Изменение структуры барьерных слоев после высокотемпературной выдержки при температуре 1150°C в течение 500 ч показано на рис. 5. Наблюдается рассасывание частиц нитридов (рис. 5, *a*, *b*), из которых состоит барьер (в основном это крупные частицы AlN), по сравнению с исходными сплошными «нитями» (рис. 2, *a*, *b*). Это происходит вследствие встречной диффузии элементов (из покрытия в сплав и из сплава к поверхности защитного слоя) и их взаимодействия с барьером.

Для сравнения состава образующихся фаз проведен фазовый анализ поверхности образцов из сплава ЖС32 с покрытиями СДП-41+ВСДП-16, [MeC₁+СДП-41]+ВСДП-16, [MeN₁+СДП-41]+ВСДП-16 после испытаний на жаростойкость при 1150°C в течение 500 ч. По результатам расшифровки дифрактограмм, в покрытии СДП-41+ВСДП-16 основной фазой является Ni₃Al, вторыми фазами – корунд Al₂O₃ и NiAlO₄ (рис. 6, *a*). В покрытии [MeC₁+СДП-41]+ВСДП-16 основными фазами покрытия являются Ni₃Al и Al₂O₃, также присутствуют менее интенсивные линии NiAl₂O₄ и HfC, в интервале углов 2θ (от 26 до 30 град) находятся рентгеновские линии, более всего соответствующие оксидам иттрия: Y₂Hf₂O₇ и YTa₇O₁₉ (рис. 6, *b*). В покрытии [MeN₁+СДП-41]+ВСДП-16 основными фазами являются Ni₃Al и корунд Al₂O₃, также в покрытии присутствуют фазы NiAlO₄, Y₂Hf₂O₇ и YAlO₃ (рис. 6, *в*).

Исследование эволюции структуры покрытий в процессе испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1200°C в течение 100 ч (рис. 7 и 8) показало результат, аналогичный испытаниям при 1150°C в течение 500 ч.

По результатам лабораторных высокотемпературных испытаний на жаростойкость наиболее высокими защитными свойствами обладало покрытие [MeN₁+СДП-41]+ВСДП-16. Изучено влияние этого покрытия на механические характеристики прочности сплава ЖС32.

Результаты испытаний на длительную прочность образцов из сплава ЖС32 при температуре 1000°C на базе испытаний 10, 100 и 500 ч представлены на рис. 9.

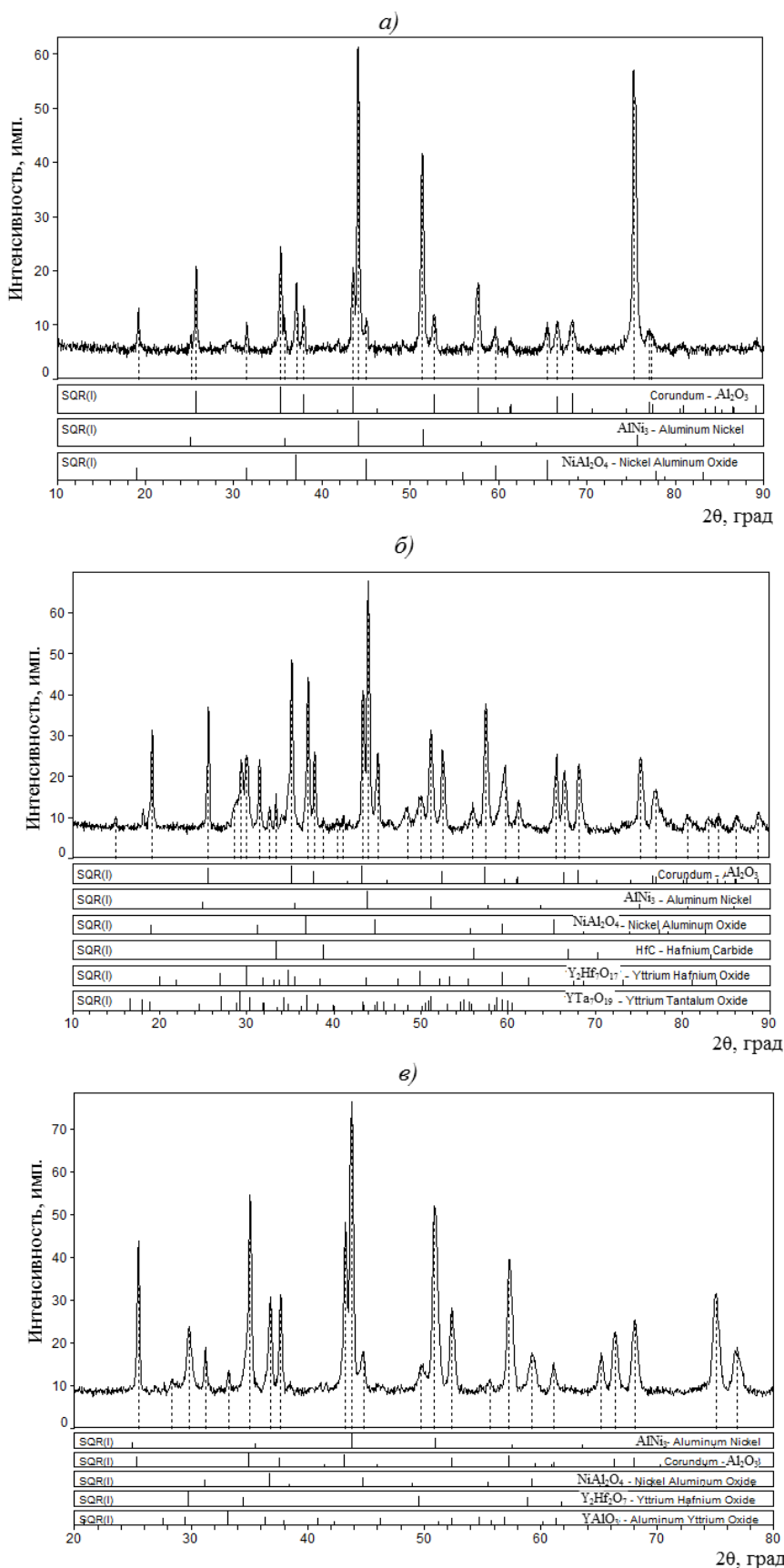


Рис. 6. Дифрактограмма образцов с покрытиями СДП-41+ВСДП-16 (а), [MeC1+СДП-41]+ВСДП-16 (б) и [MeN1+СДП-41]+ВСДП-16 (в) после испытаний на жаростойкость при 1150°С в течение 500 ч

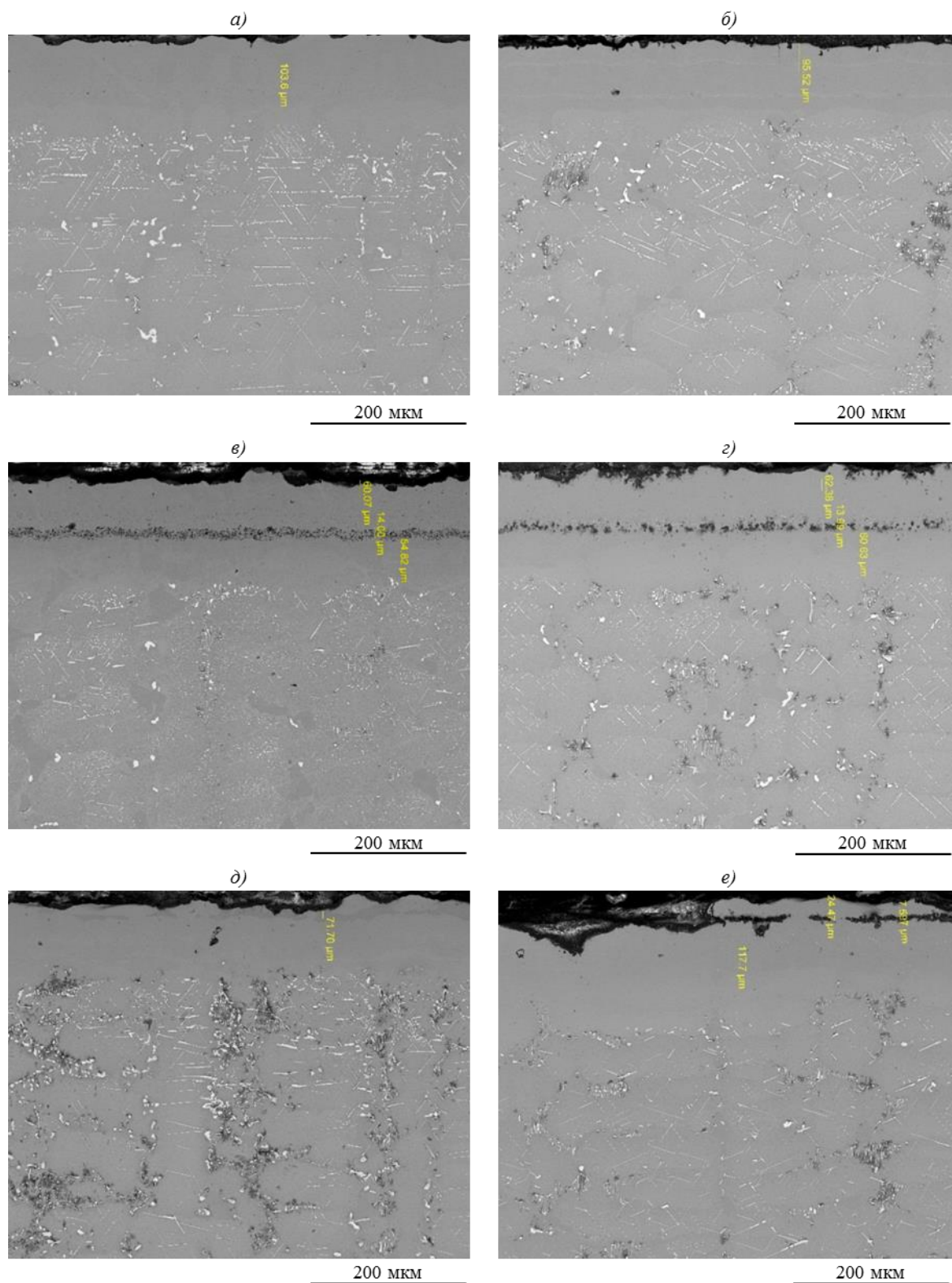


Рис. 7. Микроструктура образцов из сплава ЖС32 с жаростойкими покрытиями ВСП-9+ВСП-16 (а), СДП-41+ВСП-16 (б), [MeN2+ВСП-9]+ВСП-16 (в); [MeN1+СДП-41]+ВСП-16 (г), [MeC2+ВСП-9]+ВСП-16 (д) и [MeC1+СДП-41]+ВСП-16 (е) после испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1200°С в течение 100 ч

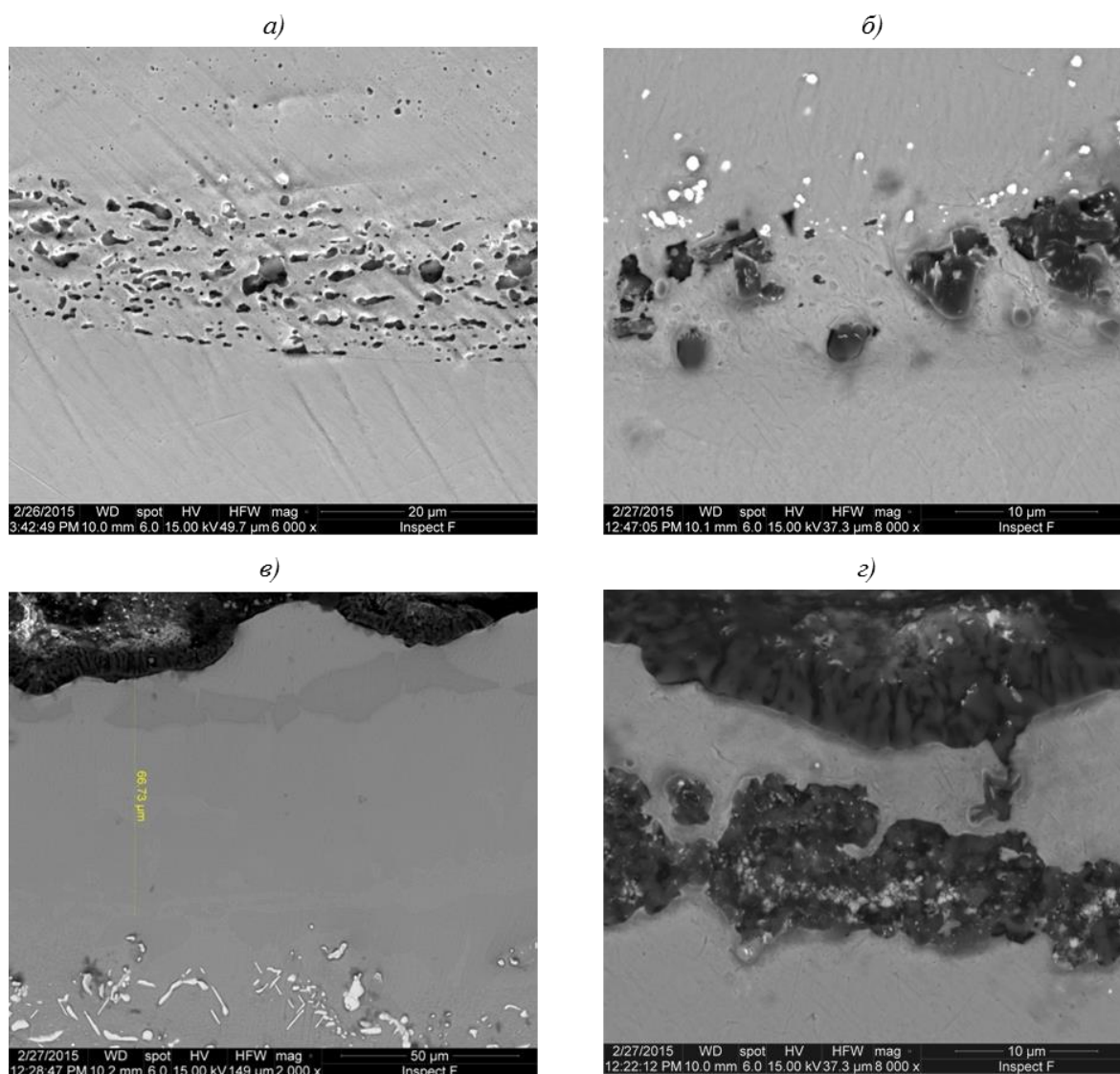


Рис. 8. Микроструктура образцов (барьерные слои) из сплава ЖС32 с жаростойкими покрытиями [MeN2++BCDP-9]+BCDP-16 (а); [MeN1+CDP-41]+BCDP-16 (б), [MeC2+BCDP-9]+BCDP-16 (в) и [MeC1+CDP-41]+BCDP-16 (г) после испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1200°C в течение 100 ч

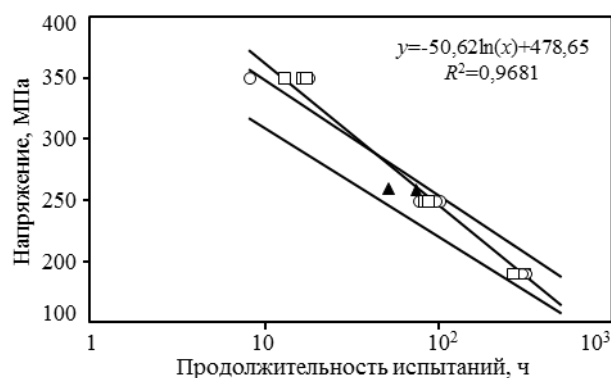


Рис. 9. Длительная прочность образцов из сплава ЖС32 с покрытиями [MeN1+CDP-41] (70 мкм)+BCDP-16 (50 г/м²) (○) и CDP-41 (70 мкм)+BCDP-16 (50 г/м²) (□) и без них (▲) после испытаний при 1000°C на базе 10; 100 и 500 ч

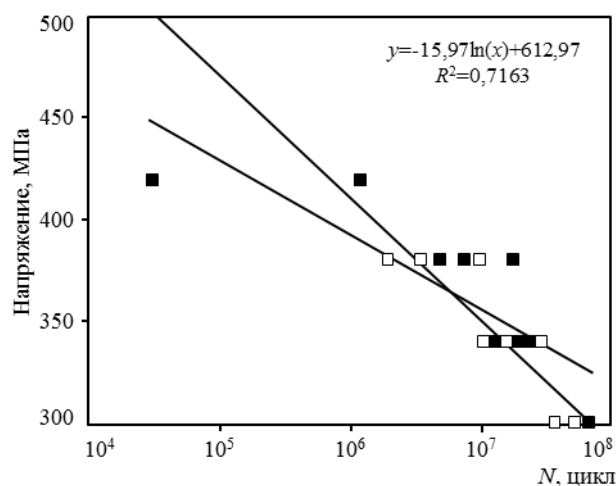


Рис. 10. Многоцикловая усталость образцов из сплава ЖС32 с покрытием [MeN1+СДП-41] (70 мкм)+ВСДП-16 (50 г/м²) (□) и без него (■) после испытаний при 900°С

Результаты исследований многоцикловой усталости образцов из сплава ЖС32 с жаростойкими покрытиями и без них при температуре 900°С приведены на рис. 10. Видно, что покрытие [MeN1+СДП-41]+ВСДП-16 не оказывает отрицательного влияния на характеристики длительной и усталостной прочности, указанные в паспорте на сплав ЖС32.

Обсуждение и заключения

Показано, что введение в конструкцию конденсационно-диффузионных покрытий композиционных барьерных слоев, содержащих нитриды металлов, повышает жаростойкость покрытий в области температур до 1200°С и препятствует процессу формирования вторичной реакционной зоны на границе «сплав–покрытие». Наличие нитридного барьера в структуре покрытия значительно снижает диффузию алюминия из внешнего слоя, повышая его жаростойкость, и снижает выделение нежелательной ТПУ фазы.

Установлено, что конденсационно-диффузионное покрытие СДП-41 (Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf)+ВСДП-16 (Al–Ni–Y) превосходит по жаростойкости при температурах 1150 и 1200°С серийное покрытие ВСДП-9 (Ni–Al–Cr–Ta–Y)+ВСДП-16 (Al–Ni–Y).

Покрытие [MeN1+СДП-41] (70 мкм)+ВСДП-16 (50 г/м²) не оказывает отрицательного влияния на длительную прочность сплава ЖС32 при температуре 1000°С на базе испытаний до 500 ч и на предел выносливости при температуре 900°С на базе 2·10⁷ циклов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ 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.
2. 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.
3. Жаропрочный сплав на никелевой основе для монокристаллического литья: пат. 2439184 Рос. Федерация; опубл. 05.10.10.
4. Жаропрочный сплав на основе никеля: пат. 2402624 Рос. Федерация; опубл. 16.06.09.
5. Жаропрочный литейный сплав на основе никеля и изделие, выполненное из него: пат. 2365656 Рос. Федерация; опубл. 30.01.08.

6. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Висик Е.М. и др. Жаропрочные никелевые сплавы низкой плотности // Литейное производство. 2012. №6. С. 5–11.
7. 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.
8. 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.
9. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising GTES // Russian metallurgy (Metally). 2012. №1. P. 1–7.
10. Будиновский С.А., Матвеев П.В., Смирнов А.А. Исследование жаростойкости литейных жаропрочных никелевых сплавов в области температур 1000–1200°C // Авиационная промышленность. 2014. №2. С. 48–52.
11. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // Металлы. 2007. №5. С. 23–34.
12. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys // Metal Sciens and Heat Treatment. 1995. №2. P. 15–18.
13. Suzuki A., Rae C.M.F. Secondary reaction zone formations in coated Ni-base single crystal superalloys // Journal of Physics: Conference Series. 2009. V. 165. P. 78–83.
14. Suzuki A., Rae C.M.F., Hobbs R.A., Murakami H. Secondary reaction zone formations in Pt-Aluminised fourth generation Ni-base single crystal superalloys // Advanced Materials Research. 2011. V. 278. P. 78–83.
15. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 17–20.
16. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Косьмин А.А. Жаростойкие ионно-плазменные покрытия для лопаток турбин из никелевых сплавов, легированных рением // МиТОМ. 2008. №6. С. 31–36.
17. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Степанова С.В. Ионно-плазменные жаростойкие покрытия с композиционным барьерным слоем для защиты от окисления сплава ЖС36-ВИ // МиТОМ. 2011. №1. С. 34–40.
18. Гаямов А.М. Жаростойкое покрытие с композиционным барьерным слоем для защиты внешней поверхности рабочих лопаток ГТД из ренийсодержащих жаропрочных никелевых сплавов / В сб. материалов XI Российской ежегодной конф. молодых науч. сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». М.: ИМЕТ РАН, 2012. С. 473–475.
19. Гаямов А.М., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Выбор жаростойкого покрытия для жаропрочного никелевого рений-рутенийсодержащего сплава марки ВЖМ4 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич журн. 2014. №1. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.03.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-1-1.