



УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-3-3

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ БАРЬЕРНОГО
СЛОЯ ПОКРЫТИЯ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИЙ
ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ВЖМ1 И ЖС36
С ЖАРОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ**

А.М. Гаямов

кандидат технических наук

С.А. Будиновский

доктор технических наук

Сентябрь 2014

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

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

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

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

А.М. Гаямов¹, С.А. Будиновский¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ БАРЬЕРНОГО СЛОЯ ПОКРЫТИЯ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ВЖМ1 И ЖС36 С ЖАРОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ

Исследовано влияние толщины композиционного барьерного слоя [СДП-2+CrC] на жаростойкость и кинетику изменения элементного состава композиций из жаропрочных сплавов ВЖМ1 и ЖС36 с жаростойким покрытием. Проведены исследования микроструктуры композиций «ЖНС–покрытие» после испытаний на жаростойкость. Установлено, что увеличение толщины барьерного слоя заметно способствует снижению скорости диффузии элементов через поверхность раздела «ЖНС–покрытие», однако применение барьерных слоев толщиной, равной 20 мкм и более, ведет к преждевременному отслоению покрытия от подложки. Полученные результаты позволяют рекомендовать к применению в составе жаростойкого покрытия барьерный слой [СДП-2+CrC] толщиной 10–15 мкм.

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

A.M. Gayatov, S.A. Budinovsky

STUDY OF AN EFFECT OF THICKNESS OF THE BARRIER COATING LAYER ON PROPERTIES OF COMPOSITIONS OF HIGH-TEMPERATURE ALLOYS VZhM1 AND ZhS36 WITH HEAT-RESISTANT COATINGS

An influence of the thickness of the composite barrier layer [SDP-2+CrC] on heat resistance and kinetics of changes in elemental compositions of VZHM1 and ZHS36 superalloys with heat-resistant coating. Microstructural investigations of «nickel superalloy–coating» compositions were carried out after the heat resistance test. It has been established that an increase in thickness of the barrier layer reduces significantly diffusion rate of elements across the «nickel superalloy–coating» interface, but the use of barrier layers with the thickness of 20 microns or more leads to a premature detach-

ment of the coating from the substrate. The obtained results allow us to recommend the use of [SDP-2+CrC] barrier layer of 10–15 microns in thickness as a part of the heat-resistant coating.

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

В предыдущей работе авторами на примере современного отечественного ренийсодержащего жаропрочного никелевого сплава (ЖНС) ЖС36-ВИ описана проблема вторичной реакционной зоны (ВРЗ) – структурного образования, формирующегося в процессе высокотемпературной выдержки в поверхностном слое изделий из ренийсодержащих ЖНС с жаростойким покрытием [1]. Формирование ВРЗ, состоящей из пластинчатых частиц ТПУ фаз с высоким содержанием тугоплавких элементов, способствует снижению прочностных характеристик жаропрочных сплавов и выявлено в ряде современных ЖНС зарубежного производства [2–4]. В работе [5] авторами установлено, что для защиты сплавов, легированных рением, типа ЖС36-ВИ целесообразно использовать многослойные покрытия с композиционными барьерными слоями, содержащими карбиды либо нитриды металлов, входящих в состав серийного жаростойкого сплава для покрытий СДП-2 [6–8]. Серийное покрытие СДП-2+ВСДП-16 с барьерным слоем [СДП-2+CrC] толщиной 10 мкм на поверхности раздела «ЖНС–покрытие» по результатам испытаний на изотермическую жаростойкость при 1100°C обеспечило надежную защиту сплава ЖС36-ВИ от окисления в течение 1000 ч. При этом глубина формирования ВРЗ в поверхностном слое подложки по окончании испытаний была в 1,5–2 раза меньше по сравнению с покрытием СДП-2+ВСДП-16 без барьерного слоя.

Цель данной работы – исследование влияния толщины барьерного слоя [СДП-2+CrC] на свойства композиций из жаропрочных сплавов ВЖМ1 и ЖС36 с жаростойким покрытием. Проведены исследования жаростойкости и структурной стабильности композиций «ЖНС–покрытие» с барьерным слоем толщиной от 5 до 40 мкм и без барьерного слоя, а также кинетики изменения элементного состава покрытий вследствие высокотемпературной выдержки в зависимости от толщины барьерного слоя.

Материалы и методы

Исследования проводили на образцах с монокристаллической структурой из жаропрочных никелевых сплавов ЖС36 и ВЖМ1. Жаростойкие покрытия были нанесены на промышленной ионно-плазменной установке с автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУТП) типа МАП-2, обеспечивающей нанесение широкого спектра защитных высокотемпературных покрытий [9–19]. Для получения покрытий использовали серийные сплавы СДП-2 (Ni–Cr–Al–Y) и ВСДП-16 (Al–Ni–Y). Формирование барьерного слоя [СДП-2+CrC] проводили в атмосфере ацетилена при давлении в рабочей камере $1 \cdot 10^{-1}$ Па, нанесение конденсированного слоя покрытия из сплава СДП-2 и диффузионного слоя покрытия из сплава ВСДП-16 выполняли в вакууме. После нанесения покрытий проводили вакуумную термическую обработку образцов по стандартному режиму для композиций «ЖНС–покрытие» при 1050°C , 3 ч.

В работе были исследованы композиции из жаропрочных никелевых сплавов ЖС36 и ВЖМ1 с покрытиями СДП-2+ВСДП-16 и [СДП-2+CrC]+СДП-2+ВСДП-16 с различной толщиной барьерного слоя (5, 10, 15, 20 и 40 мкм). Толщина слоя покрытия СДП-2 составила 60 мкм, удельный привес покрытия ВСДП-16: 45 г/м^2 .

Испытания на жаростойкость проводили в соответствии с ГОСТ 6130 на дисковых образцах ($\varnothing 25,4$ мм, $h=3$ мм) с покрытиями в атмосферной печи – в керамических тиглях с крышками при температуре испытаний 1100°C . Измерение массы образцов проводили после 10, 20, 50, 100, 200, 300, 400 и 500 ч испытаний.

Удельное изменение массы образцов Δm_{τ} (г/м^2) после τ часов испытаний рассчитывали по формуле:

$$\Delta m_{\tau} = (m_{\tau} - m_0) / S,$$

где m_{τ} – масса образца после τ часов испытаний, г; m_0 – масса образца в исходном состоянии, г; S – площадь поверхности образца в исходном состоянии, м^2 .

Микроструктуру композиций «сплав–покрытие» после испытаний на жаростойкость исследовали на оптическом микроскопе Olympus GX51, элементный состав композиций «сплав–покрытие» – на волновом рентгеновском спектрометре JСМА-733.

Результаты

Результаты испытаний на жаростойкость образцов из сплавов ЖС36 и ВЖМ1 с по-

крытиями при температуре 1100°C в течение 500 ч приведены на рис. 1.

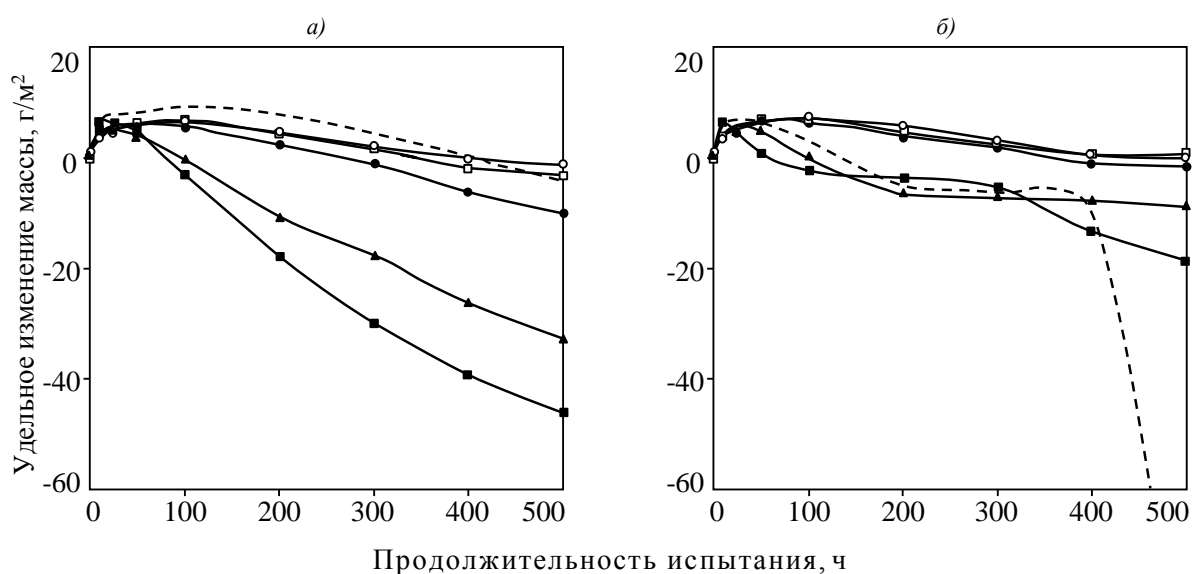


Рисунок 1. Зависимости удельного изменения массы образцов из сплава ЖС36 (а) и ВЖМ1 (б) с покрытием [СДП-2+CrC]+СДП-2+ВСДП-16 при толщине барьерного слоя 5 (□), 10 (●), 15 (○), 20 (▲) и 40 мкм (■) и без барьерного слоя (- - -) от продолжительности испытания на жаростойкость при 1100°C

Показано, что толщина барьерного слоя [СДП-2+CrC] оказывает определенное влияние на удельное изменение массы образцов с покрытиями в условиях высокотемпературной выдержки. Время до начала потери массы покрытия (точка пересечения кривой с осью абсцисс, условно обозначим ее τ_0) на образцах из сплава ЖС36 с барьерными слоями толщиной 5, 10, 15, 20 и 40 мкм составляет соответственно 350, 270, 400, 100 и 80 ч, без барьерного слоя: 400 ч. Аналогичные результаты получены на образцах из сплава ВЖМ1 с покрытиями. Для покрытий с барьерными слоями толщиной 5, 10, 15, 20 и 40 мкм τ_0 равно соответственно >500, 350, 430, 100 и 60 ч, без барьерного слоя: 130 ч.

Установлено, что покрытия, содержащие барьерные слои толщиной 20 мкм и более, на образцах из сплавов ВЖМ1 и ЖС36 при испытаниях на жаростойкость характеризуются более значительными потерями массы в сравнении с покрытиями, содержащими барьерные слои толщиной 5, 10, 15 мкм, и без барьерного слоя. Например, для покрытия на сплаве ЖС36 с барьерным слоем толщиной 40 мкм потери массы после испытаний на жаростойкость при 1100°C в течение 500 ч составили около 10% массы покрытия, а для покрытия с барьерным слоем толщиной 15 мкм – менее 1%.

Исключением стало покрытие СДП-2+ВСДП-16 без барьерного слоя на сплаве

ВЖМ1 – удельная потеря массы данной композиции после 400 ч испытаний резко возросла, достигнув к 500 ч величины, равной -95 г/м^2 (около 20% массы покрытия). Данное явление было связано с дефектами по торцам образцов и при дальнейшем анализе не учитывалось.

Результаты металлографических исследований образцов с покрытиями после испытаний на жаростойкость при 1100°C в течение 500 ч приведены на рис. 2 и 3.

Показано, что на сплавах ЖС36 и ВЖМ1 в результате испытаний на жаростойкость происходит отслоение покрытий с барьерным слоем толщиной 20 и 40 мкм, в результате чего между покрытием и подложкой образуется воздушная прослойка толщиной 30–100 мкм (см. рис. 2, а, б; 3, а, б). Таким образом, подложка напрямую контактирует с кислородом, подвергается окислению в процессе испытаний на жаростойкость, что и объясняет более значительные потери массы композиций «ЖНС–покрытие» с барьерными слоями толщиной 20 и 40 мкм.

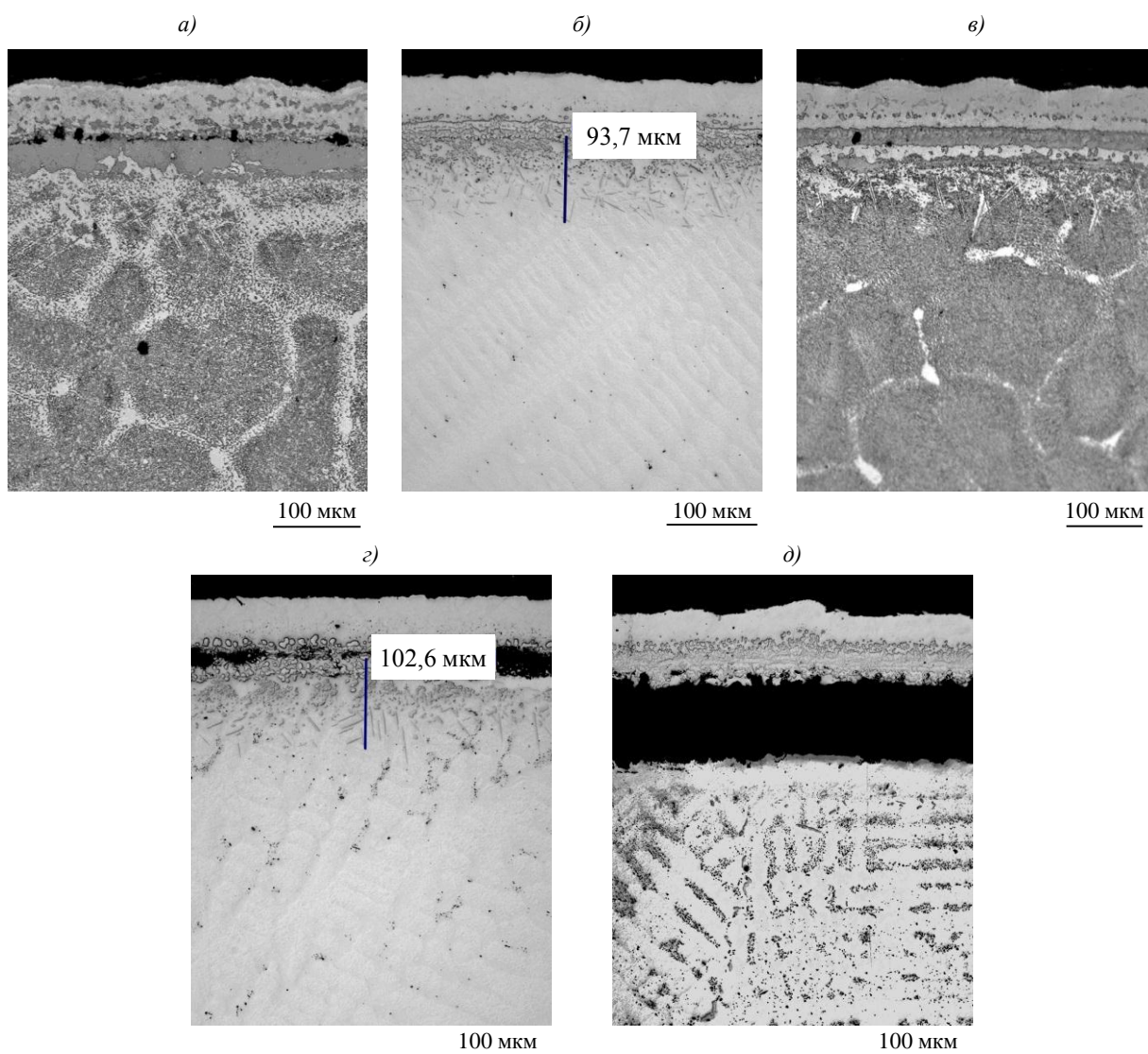


Рисунок 2. Микроструктура ($\times 200$) образцов из сплава ЖС36 после испытаний на жаростой-

кость при 1100°C в течение 500 ч с покрытием [СДП-2+CrC]+СДП-2+ВСДП-16 при толщине барьерного слоя 5 (а), 10 (б), 15 (в), 20 (г) и 40 мкм (д)

Подобные отслоения покрытий возникают в процессе испытаний на жаростойкость вследствие избыточных величин остаточных сжимающих напряжений и являются крайне нежелательными, поскольку в конечном итоге приводят к полному разрушению покрытий. Также стоит отметить, что увеличение барьерного слоя с 10 до 20 мкм не способствует снижению интенсивности формирования ВРЗ, ширина которой в обоих случаях приблизительно вдвое меньше в сравнении с покрытием без барьерного слоя и составляет ~100 мкм (см. рис. 2, б, г).

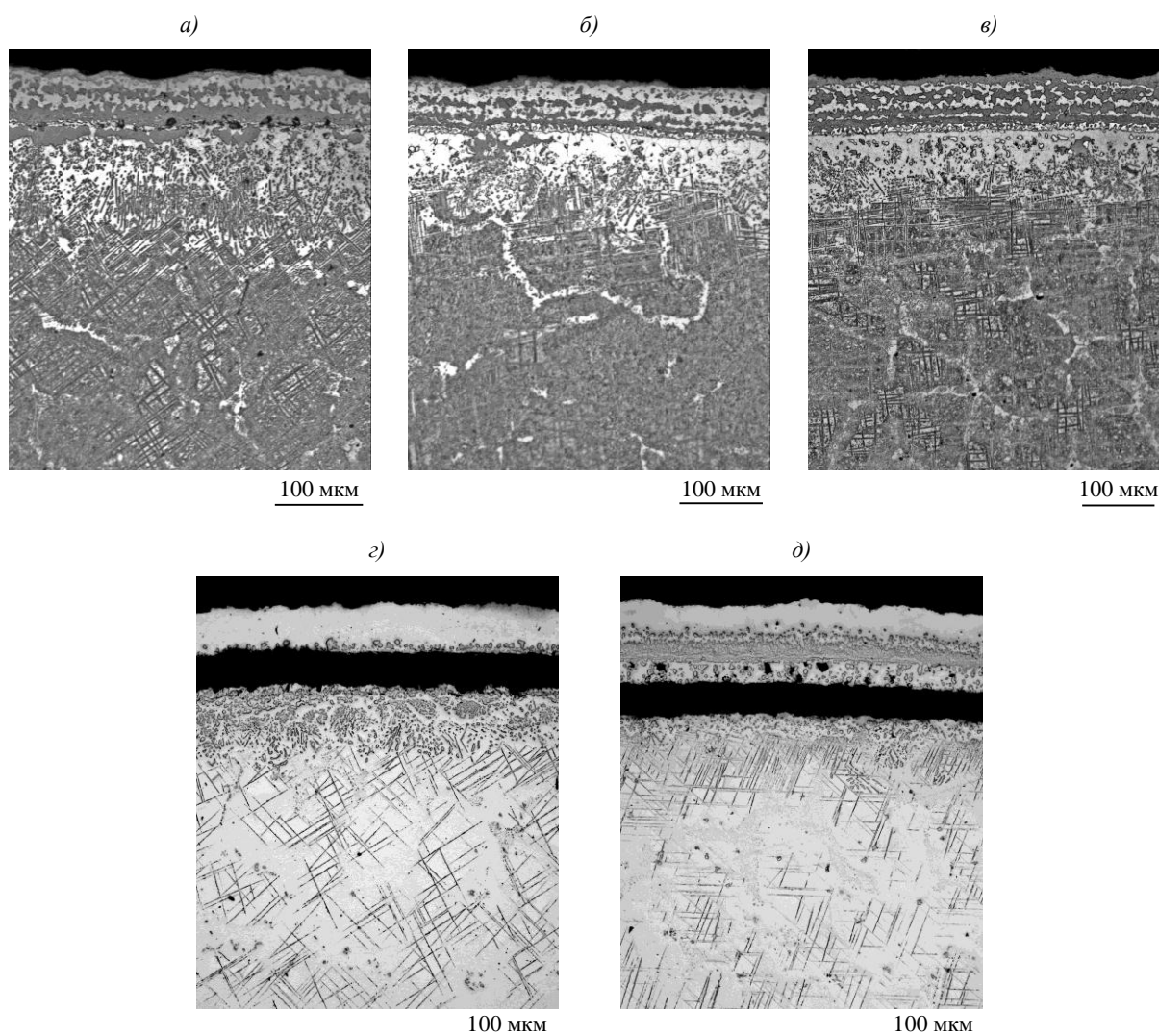


Рисунок 3. Микроструктура ($\times 200$) образцов из сплава ВЖМ1 после испытаний на жаростойкость при 1100°C в течение 500 ч с покрытием [СДП-2+CrC]+СДП-2+ВСДП-16 при толщине барьерного слоя 5 (а), 10 (б), 15 (в), 20 (г) и 40 мкм (д)

Результаты микрорентгеноспектрального анализа покрытий с барьерными слоями [СДП-2+CrC] толщиной 10, 20 и 40 мкм и без барьерного слоя на образцах из сплава

ЖСЗ6 после испытаний на жаростойкость при температуре 1100°C в течение 500 ч приведены в таблице.

Химический состав матрицы покрытий после высокотемпературной выдержки образцов из сплава ЖСЗ6 с покрытиями при температуре 1100°C в течение 500 ч

Покрытие	Содержание элементов в покрытии, % (по массе)					
	Al	Cr	Ni	Mo	W	Re
СДП-2+ВСДП-16	9,2	6,6	72,7	0,6	3,8	–
[СДП-2+CrC](10 мкм)+СДП-2+ВСДП-16	10,2	6,4	74,5	0,5	2,7	–
[СДП-2+CrC](20 мкм)+СДП-2+ВСДП-16	10,5	6,4	74,9	–	2,6	–
[СДП-2+CrC](40 мкм)+СДП-2+ВСДП-16	11,4	6,6	78,1	–	–	–

По данным таблицы видно, что увеличение толщины барьерного слоя способствует снижению скорости диффузионных процессов между покрытием и подложкой в условиях высоких температур – количество алюминия в покрытии после испытаний на жаростойкость остается более высоким, а содержание тугоплавких элементов подложки – более низким (рис. 4). Содержание хрома практически одинаково во всех покрытиях. Применение барьерного слоя [СДП-2+CrC] толщиной 40 мкм обеспечивает полное отсутствие тугоплавких элементов в покрытии после испытаний на жаростойкость, количество алюминия в покрытии при этом составляет 11,4% (по массе), что почти на 2% (по массе) больше, чем в покрытии без барьерного слоя.

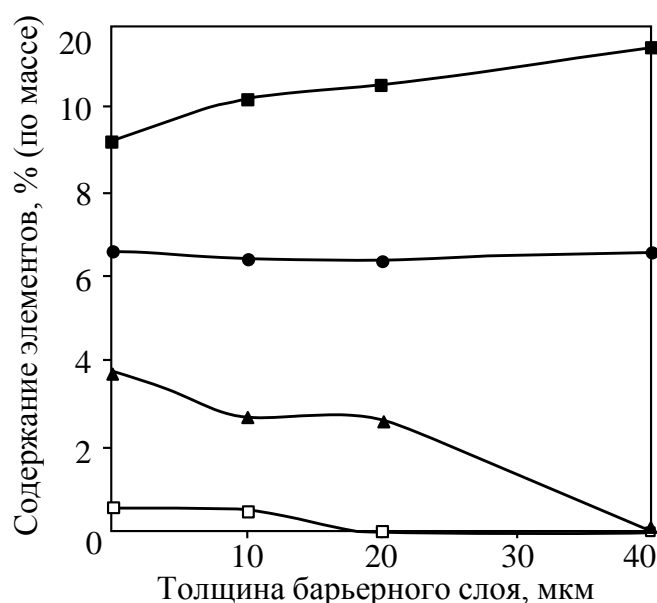


Рисунок 4. Содержание Al (■), Mo (□), W (▲) и Cr (●) в матрице покрытия после испытаний в течение 500 ч при температуре 1100°C в зависимости от толщины барьерного слоя [СДП-2+CrC]

Обсуждение и заключения

Толщину барьерного слоя [СДП-2+CrC] в составе жаростойкого покрытия

СДП-2+ВСДП-16 следует выбирать равной 10–15 мкм.

Увеличение толщины барьерного слоя [СДП-2+CrC] до 20 мкм и более способствует эффективному торможению диффузионных процессов через поверхность раздела «сплав–покрытие», однако почти не влияет на процессы формирования ВРЗ и приводит к образованию остаточных напряжений в покрытии, превышающих прочность адгезионной связи покрытия с основой.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Walston W.S., Schaefer J.C., Murphy W.H. A new type of microstructural instability in superalloys – SRZ /In: Superalloys–1996. The Mineral, Metals & Materials Society. 1996. P. 9–18.
3. Locci I., MacKay R., Garg A., Ritzert F. Successful surface treatments for reducing instabilities in advanced nickel-base superalloys for turbine blades /In: Technical Memorandum NASA/TM-2004-206622.
4. 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.
5. 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.
6. Способ обработки поверхности металлического изделия: пат. 2368701 Рос. Федерация; опубл. 27.09.2009. Бюл. 2009. №27.
7. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Василенок Л.Б., Морозова Г.И. Рений в жаропрочных никелевых сплавах для лопаток газовых турбин (Продолжение) //Материаловедение. 2000. №3. С. 38–43.
8. Каблов Е.Н. Физико-механические и технологические особенности создания жаропрочных сплавов, содержащих рений //Вестник Московского университета. Серия 2. «Химия». 2005. Т. 46. №3. С. 155–167.
9. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 60–70.

10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбин высокого давления перспективных ГТД //Металлы. 2012. №1. С. 5–13.
14. 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.
15. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Смирнов А.А. Получение керамических теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД магнетронным методом //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 3–8.
16. Чубаров Д.А., Матвеев П.В. Новые керамические материалы для теплозащитных покрытий рабочих лопаток ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 43–46.
17. Азаровский Е.Н., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности деталей из конструкционных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана. Часть II //Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 3–11.
18. 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. 2014. №1. Ст. 01 (viam-works.ru).
19. Галоян А.Г., Мубояджян С.А., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Коррозионностойкое покрытие для защиты деталей ГТД из высокопрочных конструкционных мартенситостареющих сталей на рабочие температуры до 450°C //Труды ВИАМ. 2014. №6. Ст. 03 (viam-works.ru).

REFERENCES LIST

1. Budinovskij S.A., Mubojadzhan S.A., Gajamov A.M., Kos'min A.A. Zharostojkie ionno-plazmennye pokrytija dlja lopatok turbin iz nikelovyh splavov, legirovannyh reniem [Heat-resistant ion-plasma coatings for turbine blades of nickel alloys, alloyed with rhenium] //MiTOM. 2008. №6. C. 31–36.
2. Walston W.S., Schaefer J.C., Murphy W.H. A new type of microstructural instability in superalloys – SRZ /In: Superalloys–1996. The Mineral, Metals & Materials Society. 1996. P. 9–18.
3. Locci I., MacKay R., Garg A., Ritzert F. Successful surface treatments for reducing instabilities in advanced nickel-base superalloys for turbine blades /In: Technical Memorandum NASA/TM-2004-206622.
4. 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.
5. Budinovskij S.A., Mubojadzhan S.A., Gajamov A.M., Stepanova S.V. Ionno-plazmennye zharostojkie pokrytija s kompozicionnym bar'ernym sloem dlja zashhity ot okislenija splava ZhS36-VI [Ion-plasma heat-resistant coating with composite barrier layer for protection against oxidation of the alloy ZhS36-VI] //MiTOM. 2011. №1. S. 34–40.
6. Sposob obrabotki poverhnosti metallicheskogo izdelija [A method of surface treatment of metal products]: pat. 2368701 Ros. Federacija; opubl. 27.09.2009. Bjul. 2009. №27.
7. Kablov E.N., Petrushin N.V., Vasilenok L.B., Morozova G.I. Renij v zharoprochnyh nikelovyh splavah dlja lopatok gazovyh turbin (Prodolzhenie) [Measurements in high-temperature nickel alloys for gas turbine blades] //Materialovedenie. 2000. №3. S. 38–43.
8. Kablov E.N. Fiziko-mehaničeskie i tehnologičeskie osobennosti sozdanija zharoprochnyh splavov, sodержashhih renij [Physical, mechanical and technological features of a high-temperature alloys containing rhenium] //Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 2. «Himija». 2005. T. 46. №3. S. 155–167.
9. Kablov E.N., Mubojadzhan S.A. Zharostojkie i teplozashhitnye pokrytija dlja lopatok turbiny vysokogo davlenija perspektivnyh GTD [Heat-resistant and heat-resistant coatings for turbine blades of high pressure promising GTD] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 60–70.
10. Matveev P.V., Budinovskij S.A., Mubojadzhan S.A., Kos'min A.A. Zashhitnye zharostojkie pokrytija dlja splavov na osnove intermetallidov nikelja [Heat-resistant

- protective coatings for alloys based on nickel intermetallic] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №2. S. 12–15.
11. Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Gajamov A.M., Matveev P.V. Vysokotemperaturnye zharostojkie pokrytija i zharostojkie sloi dlja teplozashhitnyh pokrytij [High-temperature heat-resistant coating and heat-resistant layers for thermal barrier coatings] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №1. S. 17–20.
 12. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A. Ionnoe travlenie i modifizirovanie poverhnosti otvetstvennyh detalej mashin v vakuumno-dugovoj plazme [Ion etching and surface modification of critical parts of machines in the vacuum arc plasma] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 149–163.
 13. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A. Teplozashhitnye pokrytija dlja lopatok turbin vysokogo davlenija perspektivnyh GTD [Thermal barrier coatings for turbine blades of the high pressure turbine engine perspective] //Metally. 2012. №1. S. 5–13.
 14. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Lucenko A.N. Ionno-plazmennye zashhitnye pokrytija dlja lopatok gazoturbinnnyh dvigatelej [Ion-plasma protective coatings for gas turbine engine blades] //Metally. 2007. № 5. S. 23–34.
 15. Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Gajamov A.M., Smirnov A.A. Poluchenie keramicheskikh teplozashhitnyh pokrytij dlja rabochih lopatok turbin aviacionnyh GTD magnetronnym metodom [Preparation of ceramic thermal barrier coatings for turbine blades working GTD magnetron sputtering] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. S. 3–8.
 16. Chubarov D.A., Matveev P.V. Novye keramicheskie materialy dlja teplozashhitnyh pokrytij rabochih lopatok GTD [New ceramic materials for thermal barrier coatings operating gas turbine engine blades] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 43–46.
 17. Azarovskij E.N., Mubojadzhjan S.A. Modifizirovanie poverhnosti detalej iz konstrukcionnyh stalej v vakuumno-dugovoj plazme titana. Chast' II [Surface modification of parts made of structural steel in the vacuum arc plasma titanium] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №1. S. 3–11.
 18. Gajamov A.M., Budinovskij S.A., Mubojadzhjan S.A., Kos'min A.A. Vybor zharostojkogo pokrytija dlja zharoprochnogo nikelvogo renij-rutenijsoderzhashhego splava marki VZhM4 [The choice of a heat-resistant coatings for heat-resistant nickel-rhenium alloy grade ruthenium VZhM4] //Trudy VIAM. 2014. №1. St. 01 (viam-works.ru).
 19. Galojan A.G., Mubojadzhjan S.A., Egorova L.P., Bulavinceva E.E. Korroziionnos-tojkoe pokrytie dlja zashhity detalej GTD iz vysokoprochnnyh konstrukcionnyh martensitostarejushhijh stalej na rabochie temperatury do 450°C [Corrosion-resistant coating

for protection GTD parts of high-strength structural steels martensitostareyuschih at operating temperatures up to 450°C] //Trudy VIAM. 2014. №6. St. 03 (viam-works.ru).