

П.В. Матвеев¹, С.А. Будиновский¹, С.А. Мубояджян¹, А.А. Косьмин¹

ЗАЩИТНЫЕ ЖАРОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ НИКЕЛЯ

Показана возможность создания жаростойкого покрытия для интерметаллидных никелевых сплавов с целью увеличения их ресурса при температуре 1200°C. Проведены испытания жаростойкости систем покрытий различных составов и конструкции. Результаты проведенных исследований на интерметаллидных никелевых сплавах показали, что оптимальным является конденсационно-диффузионное покрытие, содержащее карбидообразующие и реактивные элементы.

Ключевые слова: покрытия, жаростойкие покрытия, ионно-плазменные покрытия, ионно-плазменная технология, жаростойкость, интерметаллидные сплавы.

P.V. Matveev¹, S.A. Budinovskiy¹, S.A. Mouboiadjian¹, A.A. Kos'min¹

High-temperature coatings for intermetallic nickel-based alloys

Possibility of development of high-temperature coating enabling an increase in service life of intermetallic nickel-based alloys working at 1200°C is shown. High temperature tests of coatings of different compositions and structures were made. Experimental results show that a condensation-diffusion coating containing carbide-forming and reactive elements is optimal.

Keywords: coatings, high-temperature coatings, plasma-sprayed coatings, plasma-spraying technology, heat resistance, intermetallic alloys.

¹ 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

Нанесение покрытий проводилось на вакуумной ионно-плазменной установке с автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУ ТП) типа МАП-2.

Испытания на изотермическую жаростойкость проводились на цилиндрических образцах (размером $\varnothing 10$ мм, $h=25$ мм, без покрытия и с покрытиями) в атмосферной печи: в керамических тиглях с крышками при температуре 1200°C. Оценка жаростойкости сплавов без покрытия и с покрытием осуществлялась гравиметрическим методом, путем взвешивания образцов каждые 5–20 ч испытаний и определения изменения удельной массы образцов без учета массы окалины, осыпавшейся с их поверхности.

В настоящее время одним из направлений комплексного повышения служебных характеристик существующих конструкций газотурбинных двигателей (ГТД), в том числе продления их ресурса, снижения массы и повышения рабочих температур, является применение интерметаллидных сплавов на никелевой основе для деталей турбины высокого давления (ТВД) и турбины низкого давления (ТНД). В ВИАМ разработаны интерметаллидные никелевые сплавы, обладающие удовлетворительным комплексом механических свойств при температурах до 1200°C на базах испытаний до 1000 ч. Поскольку содержание алюминия в сплавах на основе интерметаллидов никеля выше, чем в серийных жаропрочных сплавах с интерметаллидным упрочнением, то они обладают повышенной жаростойкостью [1] на малых базах испытаний, что позволяет использовать их в ряде случаев без защитного покрытия. Однако с ростом рабочих температур в

ГТД обеспечение длительного ресурса рабочих или сопловых лопаток ТВД и ТНД не представляется возможным. В условиях интенсивных теплосмен происходит обеднение поверхности деталей из интерметаллидных сплавов алюминием и хромом, что приводит к окислению и разупрочнению сплава и может быть компенсировано применением защитного покрытия.

Задачей исследования была разработка защитного жаростойкого покрытия для интерметаллидных никелевых сплавов систем Ni–Mo–W–Cr–Ti–Zr–Al (сплав 1) и Ni–Co–Mo–W–Cr–Re–Ti–Al (сплав 2) для деталей с рабочей температурой 1200°C.

На первоначальной стадии исследования на основе информационного поиска и опыта лаборатории проводился подбор возможных систем и конструкций покрытий. Так как исследования по разработке защитных ионно-плазменных покрытий для интерметаллидных сплавов проводились впервые, то был выбран широкий спектр экспериментальных систем легирования. Нанесение покрытий проводилось на вакуумной ионно-плазменной установке с автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУ ТП) типа МАП-2 [2].

На образцы из сплавов были нанесены как серийные однослойные диффузионные, так и экспериментальные многослойные конденсационно-диффузионные покрытия, некоторые из которых содержали барьерные слои. В качестве барьерных слоев использовались карбид титана TiC, а также карбидные, оксидные и нитридные слои, образованные при напылении жаростойких слоев в результате подачи в камеру установки ацетилена, кислорода и азота соответственно.

В качестве жаростойких слоев выбраны сплавы системы Ni–Cr–Al–R, где R – элементы типа Y, Hf, Zr, оказывающие положительное влияние на жаростойкость покрытия и стабилизирующие структуру и фазовый состав покрытия. В качестве внешнего алюминидного слоя наносились сплавы систем Al–Ni–Y и Al–Si–Y. Системы выбранных сплавов, использовавшиеся при разработке экспериментального защитного покрытия на интерметаллидные сплавы:

Покрытие	Система
<i>На основе никелевых сплавов</i>	
СДП-2	Ni–Cr–Al–Y
ВЖМС-1	Ni–Cr–Al–Hf
ВЖМС-3	Ni–Cr–Al–Hf–Zr
<i>На основе алюминиевых сплавов</i>	
ВСДП-11	Al–Si–Y
ВСДП-15	Al–Si–Cr–Y
ВСДП-16	Al–Ni–Y
ВСДП-18	Al–Ni–Cr–Y.

Для предварительной оценки жаростойкости различных систем и выбора направления при создании оптимального покрытия проведены испытания сплавов без покрытий и с выбранными системами покрытий при температуре 1200°C на базе 100 ч. Графики зависимости изменения удельного уноса массы образцов от продолжительности испытаний для сплавов 1 и 2 приведены на рис. 1 и 2.

По результатам гравиметрического анализа видно, что сплав 1 и все рассмотренные ионно-плазменные покрытия на данной базе испытаний обладают одинаковой удовлетворительной жаростойкостью, за исключением покрытия системы ВЖМС-1+ВСДП-18, которое показало наибольшую потерю массы.

Анализ данных для сплава 2 показал, в свою очередь, что наблюдаются незначительные отличия – практически все исследуемые покрытия обладают более высокой жаростойкостью по сравнению со сплавом 1.

Дальнейшие исследования по выбору состава защитного покрытия проводились на сплаве 1. Выбраны составы покрытий для жаростойкого слоя, содержащие карбидо-

образующие элементы – Ta, W. Системы экспериментальных сплавов, использовавшиеся при разработке защитного покрытия для интерметаллидного сплава:

Покрытие	Система
Э1	Ni–Cr–Al–Ta–Y
Э2	Ni–Cr–Al–Re–Y
СДП-40	Ni–Cr–Al–W–Ta–Co.

Карбидообразующие элементы в покрытии позволяют ограничить диффузионное взаимодействие между сплавом и покрытием. Проведены испытания при 1200°C на базе 450 ч. Графики зависимости удельного уноса массы образцов от продолжительности испытаний для сплава 1 приведены на рис. 3.

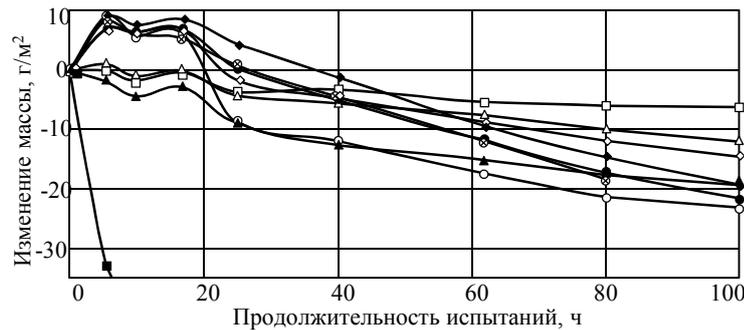


Рис. 1. Зависимости изменения удельной массы образцов при температуре испытаний 1200°C в течение 100 ч из сплава 1 с различными покрытиями:

○ – СДП-2 (60 мкм)+ВСДП-16 (40 г/м²); ■ – ВЖМС-1 (60 мкм)+ВСДП-18 (80 г/м²); □ – ВЖМС-3 (60 мкм)+ВСДП-18 (80 г/м²); ▲ – (ВЖМС-3+O₂) (20 мкм)+ВЖМС-3 (40 мкм)+ВСДП-18 (40 г/м²); Δ – ВСДП-16 (40 г/м²); ◆ – TiC (3–5 мкм)+СДП-2 (60 мкм)+ВСДП-18 (40 г/м²); ● – (СДП-2+C₂H₂) (10 мкм)+СДП-2 (60 мкм)+ВСДП-18 (40 г/м²); ◇ – (СДП-2+N₂) (10 мкм)+СДП-2 (60 мкм)+ ВСДП-18 (40 г/м²); ⊗ – без покрытия

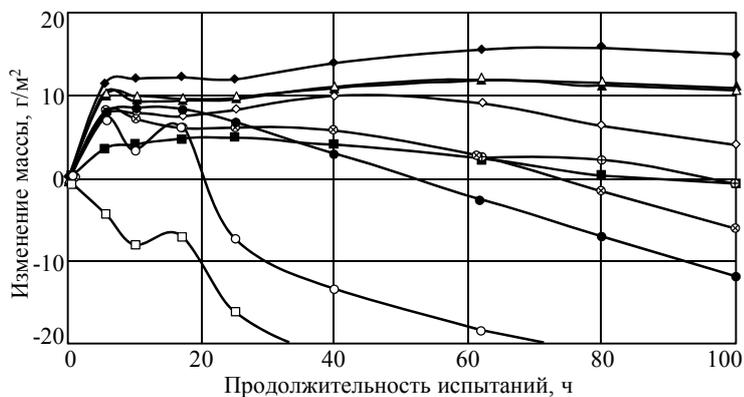


Рис. 2. Зависимости изменения удельной массы образцов при температуре испытаний 1200°C в течение 100 ч из сплава 2 с различными покрытиями:

○ – СДП-2 (60 мкм)+ВСДП-16 (40 г/м²); ■ – СДП-2 (60 мкм); □ – ВСДП-16 (40 г/м²); ▲ – ВЖМС-1 (60 мкм)+ВСДП-18 (80 г/м²); Δ – ВЖМС-3 (60 мкм)+ВСДП-18 (80 г/м²); ◆ – (ВЖМС-3+O₂) (20 мкм)+ВЖМС-3 (40 мкм)+ВСДП-18 (40 г/м²); ● – TiC (3–5 мкм)+СДП-2 (60 мкм)+ВСДП-18 (40 г/м²); ◇ – (СДП-2+C₂H₂) (10 мкм)+СДП-2 (60 мкм)+ВСДП-18 (40 г/м²); ⊗ – (СДП-2+N₂) (10 мкм)+СДП-2 (60 мкм)+ВСДП-18 (40 г/м²); ⊕ – без покрытия

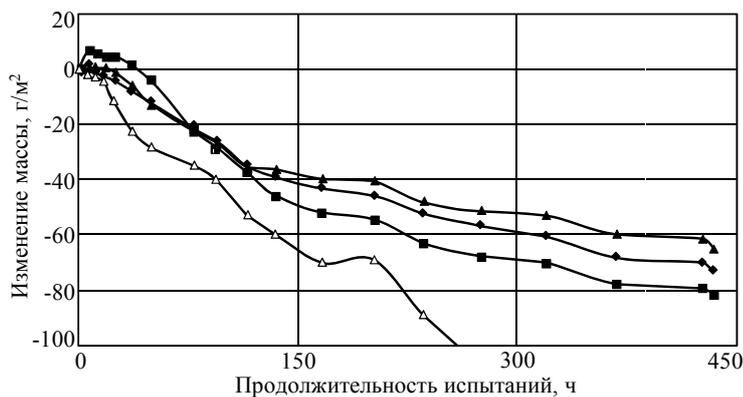


Рис. 3. Зависимости изменения удельной массы образцов из сплава 1 с различными покрытиями при температуре испытаний 1200°C в течение 450 ч:

◆ – Э1 (20 мкм)+Э2 (20 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м²); □ – Э1+C₂H₂ (10 мкм)+ВЖМС-1 (30 мкм)+ВСДП-16 (100 г/м²); ▲ – (СДП-2+C₂H₂) (10 мкм)+ВЖМС-1 (30 мкм)+Э2 (10 мкм)+ВСДП-16 (100 г/м²); Δ – ВСДП-11 (60 г/м²)

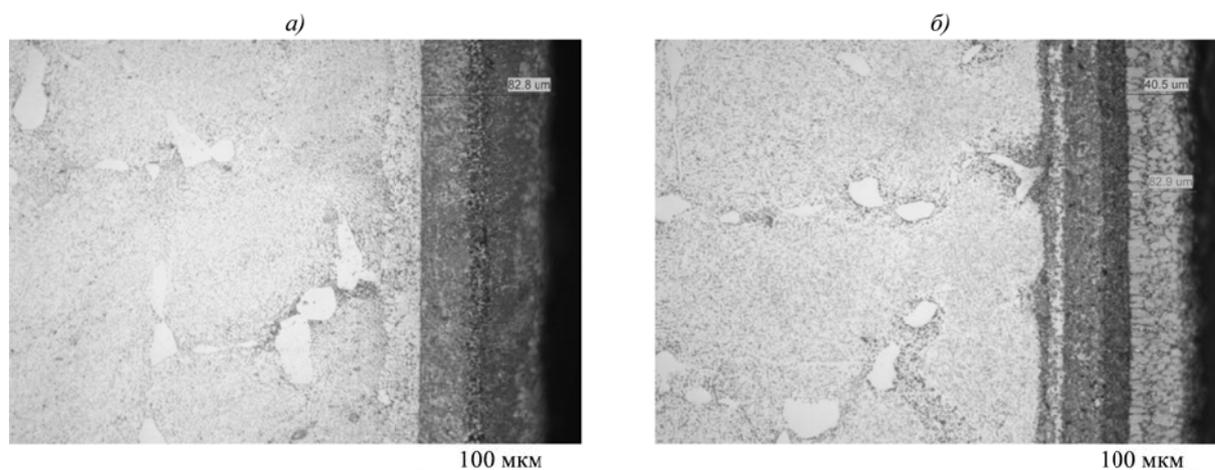


Рис. 4. Микроструктуры образцов с покрытиями в исходном состоянии:

а – сплав I+Ni-Cr-Al-Ta-Re-Y-Hf (80 мкм)+Al-Ni-Y (60 г/м²); б – сплав I+Ni-Cr-Al-Ta-Re-Y-Hf (80 мкм с карбидным подслоем)+Al-Ni-Y (60 г/м²)

Все композиции, за исключением серийного диффузионного покрытия ВСДП-11, показали практически идентичные результаты. Удельный унос массы составлял 60–70 г/м², что является хорошим результатом для такой базы испытаний при данной температуре.

По результатам исследований видно, что только защитные покрытия конденсационно-диффузионного типа с алюминидным слоем системы Al-Ni-Y обладают необходимыми защитными свойствами. Также сделан вывод, что системы жаростойких покрытий, содержащие карбидообразующие элементы, равно как и системы с элементами типа Y, Hf, обладают хорошим защитным потенциалом.

На этом основании был создан катод для нанесения жаростойких покрытий системы Ni-Cr-Al-Ta-Re-Y-Hf, содержащий как карбидообразующие элементы, позволяющие формировать диффузионный барьер на границе «сплав-покрытие», так и элементы, стабилизирующие структуру и фазовый состав покрытия, что позволит в комплексе свойств обеспечить высокую жаростойкость данного покрытия при температурах 1200–1250°C. В качестве внешнего алюминидного слоя наносили стандартный сплав системы Al-Ni-Y.

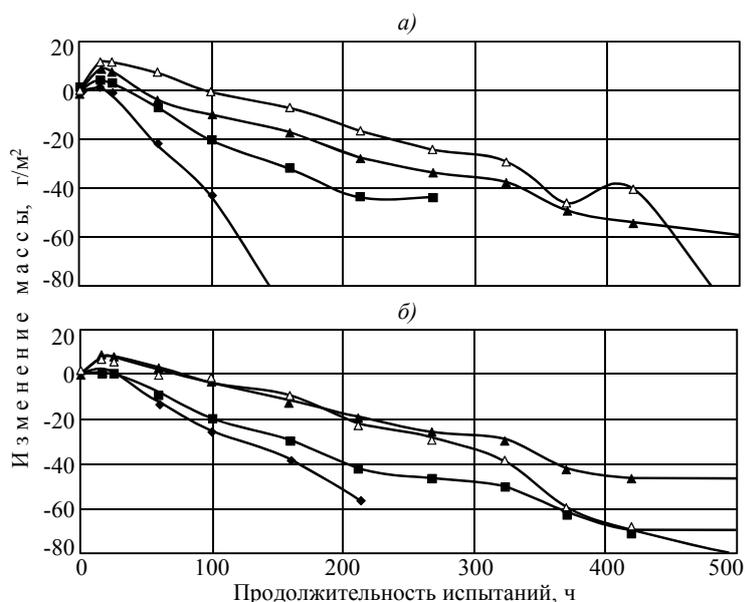


Рис. 5. Зависимости изменения удельной массы образцов из сплавов 1 (а) и 2 (б) с покрытием системы Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf+Al–Ni–Y при температуре испытаний 1200°C:

◆ – Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf (10 мкм)+Al–Ni–Y (60 г/м²); ■ – Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf (40 мкм)+Al–Ni–Y (60 г/м²); ▲ – Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf (80 мкм)+Al–Ni–Y (60 г/м²); Δ – (Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf+C₂H₂ (10 мкм))+Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf (70 мкм)+Al–Ni–Y (60 г/м²)

Для испытаний покрытия из выбранного сплава варьировались по толщине (10, 40, 80 мкм), а также на часть образцов было нанесено покрытие толщиной 80 мкм, включающее карбидный подслоя. Микроструктуры некоторых покрытий приведены на рис. 4. Проведены также испытания при температуре 1200°C на базе 500 ч. Графики зависимости удельного уноса массы образцов от продолжительности испытаний для сплавов приведены на рис. 5. Результаты испытаний показали, что наилучшим является покрытие толщиной 80 мкм, обеспечивающее наименьший унос массы для обоих сплавов на уровне 50 г/м².

Таким образом, разработано защитное покрытие системы (Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf)+(Al–Ni–Y) для интерметаллидных никелевых сплавов, обеспечивающее работоспособность при температуре 1200°C на базе 500 ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 57–60.
2. Мубоаджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 71–81.

REFERENS LIST

1. Bazyleva O.A., Arginbaeva Je.G., Turenko E.Ju. Zharoprochnye litejnye intermetallidnye splavy [Heat resisting foundry intermetallic alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 57–60.
2. Mubojadzhan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S., Egorova L.P., Bulavinceva E.E. Zashhitnye i uprochnjajushhie ionno-plazmennye pokrytija dlja lopatok i drugih otvetstvennyh detalej kompressora GTD [Protective and strengthening ion-plasma coverings for shovels and other responsible details of the GTD compressor] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 71–81.