

Гузанов Б.Н., Пугачева Н.Б., Алексеев В.Д., Слукин Е.Ю. Особенности создания комбинированных теплостойких покрытий для деталей высокотемпературного назначения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 12–19. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.02

Guzanov B.N., Pugacheva N.B., Alekseev V.D., Slukin E.Yu. Features of creating combined heat-resistant multicomponent coatings for high-temperature. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 12–19. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.02

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение

Т. 22, № 3, 2020

Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science

<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.02

УДК 621.81:620.197.6:536.495

Б.Н. Гузанов¹, Н.Б. Пугачева², В.Д. Алексеев³, Е.Ю. Слукин⁴

¹Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия

²Институт машиноведения Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

³Центральный научно-исследовательский институт металлургии и материалов, Екатеринбург, Россия

⁴Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Показано, что достижение только высокой жаро- и коррозионной стойкости разработанных многокомпонентных металлических композиций и керамических материалов становится недостаточно для обеспечения требуемых защитных свойств лопаточного аппарата современных газотурбинных установок. Весьма важными стали считаться проблемы согласования слоев в многослойных покрытиях по значениям КТР, диффузионному взаимодействию и другим эксплуатационным характеристикам. Систематические многолетние исследования позволили определить, что для этих целей наиболее приемлемыми являются составы, кристаллизующиеся с образованием эвтектических структур на основе никеля и/или кобальта, в которых за счет изменения содержания и концентрации легирующих элементов удается получать различное сочетание пластичности, сопротивления термической усталости в условиях циклического окисления и газовой коррозии. Наилучшие результаты были получены в случае применения разработанной композиции состава Ni–22Cr–16Al–1Y, напыляемой плазменным методом с использованием гранулированного конгломерированного порошка, подготовленного по специально разработанной технологии.

Для преодоления недостатков плазменного покрытия, в первую очередь невысокой термической стабильности при повышенных температурах, было предложено наносить барьерный слой на границу сплав–плазменное покрытие в виде термодиффузионной алюмосилицидной прослойки составом 28Al–2Si–1P3M. В качестве теплозащитного поверхностного слоя было выбрано напыляемое керамическое покрытие составом (ZrO₂ + 8%Y₂O₃).

В результате было разработано комбинированное трехслойное теплостойкое покрытие, которое наносили последовательно с использованием различных технологий. Первый термодиффузионный слой толщиной 40–55 мкм расположен на границе со сплавом основы и обеспечивает высокую жаро- и коррозионную стойкость, а также диффузионную стабильность всего покрытия в целом. Второй плазменный металлический слой толщиной 110–115 мкм обеспечивает высокую термостойкость покрытия и хорошую адгезию керамического внешнего слоя к металлической поверхности. Третий внешний керамический слой толщиной около 50 мкм является теплозащитным и предохраняет поверхность лопатки от перегрева. Проведенные комплексные лабораторные, стендовые и натурные испытания на лопатках в составе изделия позволили внедрить регламент и разработанный техпроцесс в серийное производство.

Ключевые слова: защитное покрытие, металлическая композиция, керамика, плазменное напыление, термодиффузия, фазовый состав, концентрация, коррозионная стойкость, структура, шероховатость.

B.N. Guzanov¹, N.B. Pugacheva², V.D. Alekseev³, E.Yu. Slukin⁴

¹Russian State Vocational-Pedagogical University, Yekaterinburg, Russian Federation

²Institute of Machine Science of the Ural branch of the RAS, Yekaterinburg, Russian Federation

³Central Research Institute of Metallurgy and Materials, Yekaterinburg, Russian Federation

⁴Ural Federal University named after the first President of Russia

B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

FEATURES OF CREATING COMBINED HEAT-RESISTANT MULTICOMPONENT COATINGS FOR HIGT-TEMPERATURE

The paper shows that achieving only high heat and corrosion resistance of the developed multicomponent metal compositions and ceramic materials is not enough to provide the required protective properties of the blade apparatus of modern gas turbine installations. The problems of matching layers in multi-layer coatings in terms of KTR values, diffusion interaction and others performance characteristics have become very important. Systematic long-term research has allowed us to determine that for these purposes, the most acceptable compositions are those that crystallize to form eutectic structures based on Nickel and/or cobalt, in which, due to changes in the content and concentration of alloying elements,

it is possible to obtain a different combination of plasticity, thermal fatigue resistance under conditions of cyclic oxidation and gas corrosion. The best results were obtained when using the developed composition of the Ni–22Cr–16Al–1Y composition, it is sprayed using a plasma method using a granular conglomerated powder prepared using a specially developed technology. To overcome the disadvantages of plasma coatings and, first of all, low thermal stability at elevated temperatures, it was proposed to apply a barrier layer to the boundary of the alloy-plasma coating in the form of a thermodiffusion aluminide layer of the composition 28Al–2Si–1PZM.

A sprayed ceramic coating of the composition ($ZrO_2 + Y_2O_3$) was chosen as a heat-protective surface layer. As a result, a combined three-layer heat-resistant coating was developed, which was applied sequentially using various technologies. The first thermal diffusion layer with a thickness of 40–55 microns is located on the border with the base alloy and provides high heat and corrosion resistance, as well as diffusion stability of the entire coating as a whole. The second plasma metal layer with a thickness of 110–115 microns provides high thermal stability of the coating and good adhesion of the ceramic outer layer to the metal surface. The third outer ceramic layer with a thickness of about 50 microns is heat-protective and protects the surface of the blade from overheating. Comprehensive laboratory, bench and field tests on the blades as part of the product allowed us to introduce the regulations and developed technical process into serial production.

Keywords: protective coating, metal composition, ceramics, plasma spraying, thermal diffusion, phase composition, concentration, corrosion resistance, structure, roughness.

В настоящее время как в России, так и за рубежом широким фронтом проводятся работы по созданию многокомпонентных металлических композиций и керамических материалов, необходимых для создания двух- и многослойных жаро- и теплостойких покрытий, напыляемых на турбинные лопатки энергетических и маршевых ГТУ. Анализ опубликованных исследований в этой области показывает [1–6], что для успешной реализации поставленных задач необходимо не только решать вопросы, связанные с защитными характеристиками покрытия или составляющих его слоев, но и изучать проблемы, возникающие из-за необходимости согласования слоев в многослойном покрытии (МСП) по КТР, диффузионному взаимодействию, другим физическим и механическим характеристикам. В противном случае, ресурс работы МСП будет лимитироваться механическими повреждениями многослойной композиции, которые не позволят полностью использовать заложенные в конструкцию и состав МСП защитные свойства [7].

Следует заметить, что наработки в этой области пока недостаточны для создания полноценной модели принципов построения МСП, поэтому при разработке подобных систем защиты необходимы систематические исследования как минимум в двух направлениях:

– во-первых, создание и аттестация свойств различных комбинаций на базе существующих жаростойких покрытий (диффузионные + напыление, многослойные напыляемые, шликерные + порошковый и т.д.);

– во-вторых, разработка и экспериментальная апробация новых составов жаростойких, коррозионностойких, теплозащитных и других материалов для создания специализированных по своим функциям слоев в МСП.

В настоящей работе выбор перспективных жаростойких композиций ориентируется на составы, кристаллизующиеся с образованием эвтектических или квазиэвтектических структур, которые, как было показано ранее [8–10], обладают существенными преимуществами перед неэвтектическими

структурами близкого химического состава. С учетом сказанного мы полагаем, что при разработке новых высокотемпературных материалов и покрытий особый интерес представляют никелевые и/или кобальтовые сплавы. В силу особенностей химического состава и кристаллической структуры они обладают лучшими защитными свойствами по сравнению с жаростойкими сплавами на железной основе и находят широкое применение в газотурбостроении.

Наиболее высокими защитными свойствами в условиях высокотемпературного окисления обладает окисная пленка $\alpha-Al_2O_3$, поэтому одним из основных компонентов жаростойкого покрытия в системе Ni(Co)–Cr–Al является алюминий. В то же время необходимо заметить, что указанные сплавы представляют собой гетерогенные системы со сложным фазовым составом, поэтому структура и свойства подобных покрытий будут определяться прежде всего количественным соотношением напыляемых элементов.

Основной фазовой составляющей практически всех алюминидных покрытий на никелевых и кобальтовых сплавах является β -твердый раствор на основе моноалюминиды Ni и/или Co соответственно, который и является главным поставщиком алюминия в приповерхностные слои, обеспечивая восстановление и сохранность защитной пленки $\alpha-Al_2O_3$ на поверхности покрытия в процессе эксплуатации лопаток. Следует заметить, что система кобальт–алюминий (Co–Al) характеризуется значительно меньшей растворимостью алюминия в кобальте по сравнению с системой (Ni–Al), поэтому никель является предпочтительным элементом в напыляемых композициях [11].

Важной фазовой составляющей в системе Ni–Cr–Al является γ' -упорядоченный твердый раствор на основе интерметаллида с ГЦК-решеткой типа Ni_3Al . Эта фаза образуется в покрытиях обычно в процессе эксплуатации, однако она может присутствовать и в исходном состоянии. По своим свойствам γ' -фаза обладает сравнительно узкой областью гомогенности, как и твердый раствор $\gamma-Ni$,

но отличается от него высокой степенью упорядоченности, сохраняющейся до очень высоких температур. Соединение Ni_3Al является промежуточным по жаростойкости между γ -твердым раствором и β -фазой, причем такого соединения в системе Co–Cr–Al не существует.

Свой вклад в формирование защитных свойств покрытий (Me–Cr–Al) + Л.Э. (легирующий элемент) вносит γ -фаза с ГЦК-решеткой, которая представляет собой твердый раствор на основе Ni, в котором могут растворяться Al, Cr, Mo, W, Ti. При этом за счет легирования γ -фазы алюминием и хромом обеспечивается стойкость к окислению, тогда как хром и титан повышают стойкость к газовой коррозии. С учетом сказанного в зависимости от назначения и условий работы защищаемых изделий в качестве основы покрытий используют или кобальт, или никель, или их сочетания. В частности, покрытия на основе кобальта Co–Cr–Al–Y обладают исключительной стойкостью против газовой коррозии при наличии солей морской воды, в связи с чем они получили широкое распространение для защиты лопаток турбин корабельных ГТУ, в то время как для работы в условиях высокотемпературной окислительной среды преимущества имеют покрытия на никелевой основе с повышенным содержанием алюминия [12]. В то же время, используя сплавы системы Ni–Co–Cr–Al–Y комплексно, можно достичь сочетания высокой структурной и фазовой стабильности покрытия с его способностью противостоять высокотемпературным окислению и коррозии.

Другими словами, изменяя содержание легирующих элементов в указанных сплавах, удается получать различные сочетания пластичности, жаростойкости, сопротивления термической усталости и коррозионной стойкости напыляемых покрытий в условиях циклического окисления и газовой коррозии, усугубленной присутствием серы и хлоридов. В сплавах на никелевой основе обогащение γ -твердого раствора хромом ограничивает растворимость в нем алюминия, что приводит к увеличению доли интерметаллидов в структуре покрытия в процессе тепловых выдержек. В то же время хром тормозит образование (γ - Ni_3Al)-фазы, т.е. способствует сохранению (β -NiAl)-фазы, однако, с другой стороны, увеличение содержания хрома в композиции Me–Cr–Al–Y снижает пластичность покрытия и, соответственно, уменьшает сопротивление термической усталости защитного слоя [13]. Зависимость скорости коррозии от содержания хрома и алюминия показана на рис. 1.

В результате фазовый состав покрытия определяется соотношением хрома и алюминия в сплаве, причем увеличение содержания хрома и одновременное снижение концентрации алюминия приводит

к росту КТР покрытий Me–Cr–Al–Y. Хром в интервале концентраций 15–30 мас. % слабо влияет на жаростойкость покрытий Ni–Cr–Al–Y в изотермических условиях окисления. Увеличение содержания хрома до 40 мас. % приводит к снижению термической стабильности конденсатов.

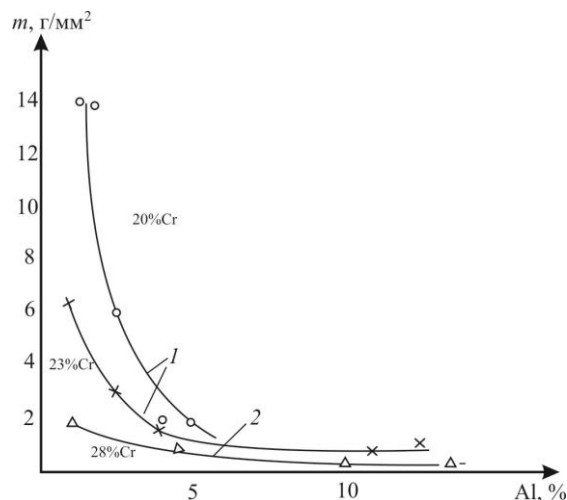


Рис. 1. Зависимость скорости коррозии (потери массы) конденсатов и покрытий Co–Cr–Al–Y на никелевых сплавах от содержания хрома и алюминия. Изотермическое окисление на воздухе под слоем черноморской соли в течение 30 ч: 1 – 1173 К; 2 – 1223 К

Дополнительное введение в сплавы Ni(Co)–Cr алюминия приводит к образованию (β -Ni(Co)Al)-фазы. Следует заметить, что по мере увеличения до 30 мас. % содержания алюминия в композиции возрастает микротвердость и снижается пластичность покрытия, которая является функцией объемной доли интерметаллида β -MeAl, т.е. содержания алюминия. В то же время уменьшение до 10 мас. % концентрации алюминия в покрытиях Co–Cr–Al–Y снижает температуру хрупко-вязкого перехода на 400–500 К (рис. 2). В целом введение в состав композиции хрома до 22 мас. % и алюминия до 16 мас. % оказывается вполне достаточно для обеспечения напыляемому покрытию необходимых служебных свойств в условиях высокотемпературного окисления и коррозии, что особенно заметно для составов на никелевой основе, где при нагреве формируется более совершенная окисная пленка [14].

Весьма полезно введение в состав композиции иттрия в количестве до 1 мас. %, который входит в состав покрытия в виде окислов Y_2O_3 , YAl_2O_5 и $Y_2Al_5O_2$, а также в присутствии никеля способствует образованию интерметаллида Ni_9Y . Частицы окислов Y_2O_3 равномерно распределяются по границам зерен формирующегося многокомпонентного защитного слоя и скрепляют тем самым пленку оксида алюминия Al_2O_3 , образующегося на поверхности

покрытия при тепловых выдержках в окислительной среде.

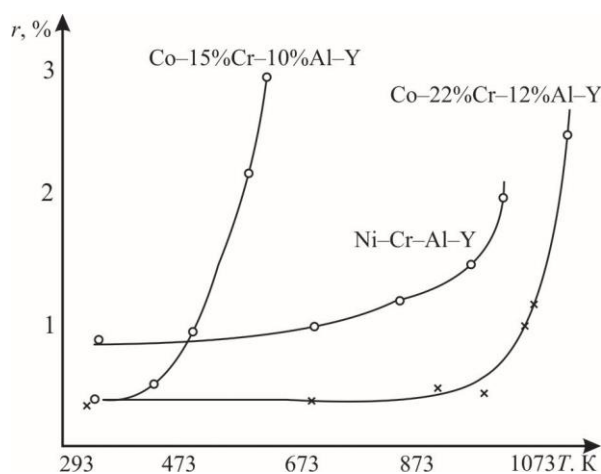


Рис. 2. Температура хрупко-вязкого перехода конденсатов Co–Cr–Al–Y с различным содержанием алюминия

Кроме того, отмечается, что комплексные окислы, содержащие алюминий и иттрий, располагаясь в приповерхностных слоях, препятствуют диффузии атомов алюминия из основы в окисную пленку, снижая величину внутренних напряжений в окалине и за счет этого существенно ограничивая ее склонность к осыпанию в процессе эксплуатации [15].

Обобщая сказанное и учитывая собственные исследования для защиты жаропрочных никелевых сплавов от высокотемпературного окисления и газовой коррозии, мы предложили композицию в виде системы Ni–22Cr–16Al–1Y, наносимую плазменным методом с использованием гранулированного конгломерированного порошка, подготовленного по специально разработанной технологии. В то же время необходимо учитывать, что плазменные покрытия за счет специфики нанесения обладают рядом недостатков, среди которых наиболее значимыми следует считать развитую внутреннюю пористость и, как следствие, невысокую термическую стабильность при повышенных температурах.

Для преодоления этих недостатков, как показано в работе [16], можно использовать в качестве барьерного слоя нанесение на границу сплав–плазменное покрытие термодиффузионной алюмосилицидной прослойки, в частности в виде покрытия составом Al–Si–PЗМ. Основной фазовой составляющей этого слоя является моноалюминид никеля β -NiAl, легированный кремнием в количестве до 2 % и PЗМ (Ce, La), с содержанием последних в сумме не более 1 %. Этот слой вносит свой вклад в обеспечение высокой жаро- и коррозионной стойкости, а также диффузионной стабильности всего

двухслойного покрытия в целом за счет эффективного препятствия диффузионному перераспределению никеля в защитный алюминидный слой при высоких температурах.

Кроме того, особую роль в покрытии играет кремний, который растворяется в γ - и β -фазах и тем самым увеличивает коррозионную стойкость окисной пленки α -Al₂O₃ и ее адгезию с защитным многокомпонентным покрытием, а также тормозит диффузию кислорода и вредных примесей от сгоревшего топлива через пленку легированного оксида SiAl₂O₃ непосредственно в защитное покрытие, что замедляет его деградацию [17]. Весьма важно, что при термодиффузионном насыщении за счет специфики газодинамики процесса создаются условия для формирования покрытия, в том числе на внутренней полости и перфорационных отверстиях охлаждаемых лопаток турбины, исключая тем самым возможность зарождения микротрещин на этих поверхностях.

Следует заметить, что на определенном этапе нанесение подобных двухслойных покрытий обеспечивало необходимое продление ресурса рабочих и сопловых лопаток энергетических и силовых газотурбинных установок, работающих в условиях воздействия рабочих газов при высоких температурах. В то же время увеличение температуры газа в авиационных ГТД и рост агрессивности топлива, используемого в промышленных и корабельных ГТУ, потребовало, чтобы современные защитные покрытия обладали не только высокой жаро- и коррозионной стойкостью, но и служили термическим барьером по отношению к тепловому потоку продуктов сгорания топлива. Такого рода покрытия получают путем плазменного напыления защитных слоев из керамики, обладающей низкой теплопроводностью, причем наиболее подходящим материалом для этой цели считается диоксид циркония ZrO₂ [18–20].

Вследствие низкого значения модуля Юнга и более высокого коэффициента термического расширения (ТКЛР), чем у Al₂O₃, оксид ZrO₂ лучше совместим с защитными жаростойкими покрытиями на основе никеля, так как при термоциклировании в реальных условиях эксплуатации в нем возникают меньшие напряжения, чем в термобарьерных покрытиях на основе Al₂O₃. При нагреве диоксид циркония существует в виде трех полиморфных структурных модификаций, и, для того чтобы стабилизировать высокотемпературную кубическую модификацию с рабочей температурой свыше 1200 °С, вводят добавки оксида иттрия Y₂O₃, который оказывает наибольший эффект упрочнения. Экспериментально показано, что наилучшие результаты получены при введении в ZrO₂ до 6–8 % оксида иттрия,

что при сохранении высокой жаростойкости способствует повышению прочности и долговечности всей керамики в целом [21].

Существенным недостатком теплозащитных керамических слоев на основе ZrO_2 является низкая прочность сцепления с металлической поверхностью, а также высокая склонность к растрескиванию и отслаиванию в результате существенных различий в КТР. Удачным решением этой проблемы можно считать нанесение промежуточного металлического подслоя, обладающего высокой адгезией и к керамике, и к металлу-основе, например напыляемый сплав системы Ni(Co)–Cr–Al(Y). Химический и фазовый состав подобного подслоя должен обеспечивать, во-первых, защиту поверхности лопаток от газовой коррозии; во-вторых, промежуточное значение КТР между сплавом-основой и керамикой; в-третьих, получение при эксплуатации тонкой и прочной пленки Al_2O_3 на границе с керамическим слоем. Однако в этом случае необходимо учитывать, что работоспособность теплозащитного покрытия в реальных условиях зависит и от содержания иттрия в подслое Ni–Co–Cr–Al–Y. Благоприятное влияние этого элемента в рассматриваемой системе проявляется в малых концентрациях, не превышающих 1 мас. %, и при более высокой концентрации снижается термостойкость всего покрытия в целом [22].

В результате, на требуемом уровне повысить долговечность защитного покрытия в условиях воздействия высоких температур и агрессивных газовых сред можно за счет последовательного нанесения нескольких поверхностных слоев с разными эксплуатационными возможностями. В этом случае сразу решается несколько практических задач: повышается коррозионно-эрозионная стойкость, снижается температура стенки лопатки и появляется возможность защиты внутренней полости воздухоохлаждаемых лопаток [23].

Исследуемое в работе комбинированное трехслойное термостойкое покрытие КТП-2 получали путем последовательного нанесения термодиффузионного покрытия Al–Si–PЗМ и покрытий, получаемых плазменным напылением в камере низкого давления. Первым на изделия и образцы-свидетели наносили термодиффузионный слой Al–Si–PЗМ в герметичных контейнерах с плавким затвором. Использовали порошковую смесь следующего состава: 98 мас. % порошка сплава 49Fe–28Al–17Si–6PЗМ и 2 мас. % активатора AlF_3 . Термодиффузионное насыщение проводили при температуре 950 °C в течение 6 ч.

Перед нанесением второго слоя проводили струйно-абразивную обработку поверхности образцов и лопаток с целью очистки ее от пленок окислов и придания ей необходимой шероховатости. Плазменные слои Ni–Cr–Al–Y и ZrO_2 – Y_2O_3 напыляли на установке 15-ВБ-01 по режиму: $I = 200$ А, $L = 110$ мм, $Q_{Ar} = 0,6$ л/с, $Q_{N_2} = 0,3$ л/с, $Q_{Tr} = 0,15$ л/с. Как показали исследования, данный режим обеспечивает в подслое минимум пористости на уровне 4–5 об. % и максимальное значение прочности сцепления с алюмосилицированным слоем не ниже 30 МПа и с керамическим слоем $ZrO_2 + 8\% Y_2O_3$ не ниже 10 МПа [24]. Плазменный металлический подслоя наносили с использованием гранулированного порошка Ni–22Cr–16Al–1Y, а для плазменного напыления теплозащитного слоя использовали порошок ЦИ-8 ($ZrO_2 + 8\% Y_2O_3$). Перед напылением порошок ЦИ-8 классифицировали на ситах с выделением фракции 40–100 мкм и прокаливали в муфельной печи при температуре 800 °C в течение 3 ч.

На рис. 3 показана микроструктура сформированного многослойного покрытия, нанесенного на лопатки газотурбинной установки из сплава ЭП975-ИД.

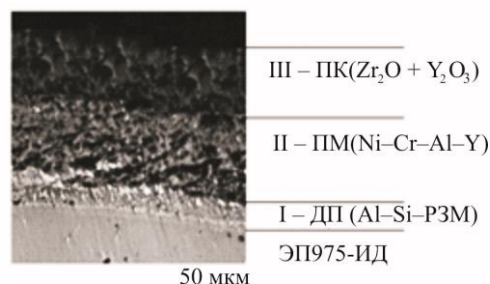


Рис. 3. Микроструктура покрытия КТП-2:
ПК – плазменный керамический слой, обеспечивающий защиту от высоких температур;
ПМ – плазменный металлический подслоя;
ДП – диффузионное жаростойкое покрытие

Первый слой 28Al–2Si–1PЗМ толщиной 40–55 мкм расположен на границе со сплавом-основой. Этот слой обеспечивает высокую жаро- и коррозионную стойкость, а также диффузионную стабильность всего покрытия в целом, т.е. эффективно препятствует диффузионному перераспределению никеля в защитное покрытие при высоких температурах. Второй плазменный слой Ni–Cr–Al–Y толщиной 115 мкм состоит из β -алюминиды NiAl и твердого раствора Cr в γ -Ni. Этот слой обеспечивает высокую термостойкость покрытия, а также хорошую адгезию керамического внешнего слоя к поверхности. Третий внешний керамический слой $ZrO_2 + Y_2O_2$ толщиной около 50 мкм является теплозащитным, т.е.

снижает температуру поверхности сплава лопатки в процессе эксплуатации.

В таблице приведены параметры комбинированного покрытия, определенные с использованием методов металлографии, фазового и микрорентгено-спектрального анализа.

Важным показателем качества плазменных покрытий является шероховатость поверхности, которая в зависимости от условий эксплуатации детали не должна превышать допустимых значений. Так, рабочие поверхности деталей, которые находятся в динамическом контакте с окружающей средой и перемещаются относительно друг друга, требуют высокой точности поверхности, и их шероховатость должна соответствовать по оцениваемым параметрам $Ra \approx 2,5 \dots 0,16$ и $Rz \approx 10 \dots 0,8$ мкм [25].

Параметры трехслойных комбинированных покрытий в исходном состоянии

Тип покрытия	Состав слоя	Толщина слоя, мкм	Содержание элементов, мас. %, и фазовый состав					
			Cr	Al	Ni	Si	Zr	Y
КТП-2	Al-Si-РЗМ	40–55	6–8	26–30	47–52	1–2	–	–
	Ni-Cr-Al-Y	110–120	γ : 29–31 β : 9–11	γ : 4–6 β : 18–20	γ : 63–65 β : 70–72	–	–	<1
	ZrO ₂ +8Y ₂ O ₃	50–55	–	–	–	–	65–70	6–7

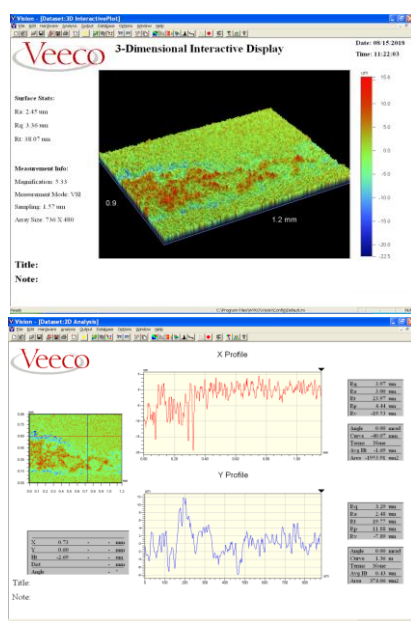


Рис. 4. Профиль поверхности и шероховатость лопатки после проведения алюмосилицирования, струйной абразивной обработки поверхности и последующего нанесения плазменного подслоя и керамики

Исследование поверхности плазменного покрытия было выполнено с помощью трехмерно отображающего анализатора поверхности WykoNT-1100 – оптического интерферометрического профилометра с программным комплексом Veeco. На рис. 4 показаны профиль и шероховатость поверхности лопатки после нанесения всех слоев покрытия в исходном состоянии. В результате выполненного анализа установлено, что шероховатость поверхности лопаток изделия с покрытием КТП-2 $Ra = 2,47$ мкм, а $Rz = 3,36$ мкм, что вполне приемлемо для деталей проточной части газотурбинных установок.

В заключение необходимо сказать, что после проведенных лабораторных, стендовых и натуральных испытаний покрытия на лопатках в составе изделия принято решение о передаче разработанной технологии нанесения трехслойного защитного покрытия в серийное производство.

Список литературы

1. Косицын С.В. Сплавы и покрытия на основе моноалюмида никеля. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2000. – 277 с.
2. Гузанов Б.Н., Косицын С.В., Пугачева Н.Б. Упрочняющие защитные покрытия в машиностроении. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2004. – 244 с.
3. Мубояджан С.А., Лесников В.П., Кузнецов В.П. Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД. – Екатеринбург: Квист, 2008. – 208 с.
4. High temperature coatings for gas turbine blades: a review / R. Sivakumar [et. al] // Surf. Coat. Techn. – 1989. – Vol. 37. – P. 261–265.
5. Crot A.S., Martyn I.K. Behavior of plasma sprayed ceramic thermal-barrier coatings for gas turbine application // Amer. Ceram. Soc. Bull. – 1981. – Vol. 60(8). – P. 807–811.
6. Chaki T.K., Singht A.K., Sadananda K. Effect of CoCrAlY coating on microstructural stability and creep behavior of nickel-base superalloy // Thin Solid Films. – 1989. – No 168. – P. 207–220.
7. Панков В.П., Шаталов А.И., Соловьев В.А. Структурные изменения в жаростойких покрытиях лопаток турбин при эксплуатации // Научопарк. – 2014. – № 2–2(22). – С. 51–55.
8. Особенности структуры и свойств ($\gamma + \beta$) сплавов Ni-Cr-Al вблизи эвтектического состава / С.В. Косицын, Б.Н. Гузанов, С.Д. Алексин [и др.] // ФММ. – 1990. – № 9. – С. 114–122.
9. Купченко Г.В., Нестерович Л.Н. Структура и свойства эвтектических композиционных материалов. – Минск: Наука и техника, 1986. – 200 с.
10. Структура и фазовые превращения в направленно кристаллизованных эвтектических сплавах системы Ni-Cr-Al / К.В. Горев, Г.П. Горецкий, Г.В. Купченко [и др.] // Докл. Акад. наук БССР. – 1986. – Т. 30, № 4. – С. 334–336.
11. Диаграммы состояния металлических систем / под общ. ред. Н.В. Агеева; ВИНТИЭ. – М., 1961. – Вып. 4. – 183 с.

12. Пугачева Н.Б. Современные тенденции развития жаростойких покрытий на основе алюминидов железа, никеля и кобальта // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. – 2015. – № 3. – С. 51–82.

13. Мовчан Б.А., Малашенко И.С. Жаростойкие покрытия, осажденные в вакууме. – Киев: Наукова думка, 1983. – 232 с.

14. Гузанов Б.Н., Мигачева Г.Н., Обабок Н.В. Разработка и исследование многослойных комбинированных покрытий высокотемпературного назначения // *Sciences of Europe, Praha, Czech Republic*. – 2017. – No 16(16). – P. 83–86.

15. Owczarski W.A. Coating and advanced ceramics systems in aircraft gas turbines // *Mater. and Soc.* – 1984. – Vol. 8, no 2. – P. 441–451.

16. Модифицированное алюмосилицидное покрытие для жаропрочных никелевых сплавов / Гузанов Б.Н., С.В. Косицын, В.П. Кузнецов [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1985. – № 1. – С. 21–23.

17. О влиянии кремния на защитные свойства алюминидных покрытий / Б.Н. Гузанов, В.П. Кузнецов, С.В. Косицын [и др.] // *Защита металлов*. – 1982. – Т. 18, № 1. – С. 157–159.

18. Девойно О.Г., Оковитый В.В. Плазменные теплозащитные покрытия на основе диоксида циркония с повышенной термостойкостью // *Наука и техника*. – 2015. – № 1. – С. 35–39.

19. Структура и физико-механические свойства жаростойких газопламенных покрытий NiCr–CoAl₄/ZrO₂ для турбинных лопаток газотурбинных двигателей / Ю.П. Тарасенко, И.Н. Царева, О.Б. Бердник [и др.] // *Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та*. – 2011. – № 3(27). – С. 164–168.

20. Лесников В.П., Кузнецов В.П., Конакова И.П. Конструирование комплексных защитных покрытий для монокристаллических охлаждаемых турбинных лопаток современных ГТД // *Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та*. – 2012. – № 3(34). – С. 211–215.

21. Miller R.A., Garlink R.G., Smialek I.L. Phase distributions in plasma – sprayed zirconia-yttria // *Americ. Ceram. Soc. Bull.* – 1983. – Vol. 62, no 12. – P. 1355–1358.

22. Качанов Е.Б., Тамарин Ю.А. Термомеханическая усталость защитных покрытий лопаток турбин // *Технология легких сплавов*. – 2002. – № 4. – С. 122–128.

23. Гузанов Б.Н., Косицын С.В., Пугачева Н.Б. Особенности создания и перспективы использования защитных покрытий при нестационарном тепловом и механическом нагружении // *Вестник УГТУ УПИ. Проблемы повышения контактной прочности металлических сплавов*. – 2004. – № 2(32). – С. 224–235.

24. Pugacheva N.B., Guzanov B.N., Obabkov N.V. Studying the structure and adhesion strength of thermal barriers coating // 13th Int. Conf. on Mechan., Resource and Diagnostics of Materials and Struct. (MRDMS-2009), Ekaterinburg, 9–13 December 2019. – Ekaterinburg, 2019. – Vol. 2176. – P. 4.

25. Маркова Т.В., Крьюжановская И.М. Шероховатость поверхности: метод. указания. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2006. – 32 с.

2. Guzanov B.N., Kositsyn S.V., Pugacheva N.B. Uprochniaushchie zashchitnye pokrytiia v mashinostroenii [Strengthening protective coatings in mechanical engineering]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo UrO RAN, 2004, 244 p.

3. Muboiadzhani S.A., Lesnikov V.P., Kuznetsov V.P. Kompleksnye zashchitnye pokrytiia turbinykh lopatok aviatsionnykh GTD [Complex protective coatings of aircraft GTD turbine blades]. Ekaterinburg: Kvist, 2008, 208 p.

4. Sivakumar R. et. al. High temperature coatings for gas turbine blades: a review. *Surf. Coat. Techn.*, 1989, vol. 37, pp. 261–265.

5. Crot A.S., Martyn I.K. Behavior of plasma sprayed ceramic thermal-barrier coatings for gas turbine application. *Amer. Ceram Soc. Bull.*, 1981, vol. 60(8), pp. 807–811.

6. Chaki T.K., Singht A.K., Sadananda K. Effect of CoCrAlY coating on microstructural stability and creep behavior of nickel-base superalloy. *Thin Solid Films.*, 1989, no. 168, pp. 207–220.

7. Pankov V.P., Shatalov A.I., Solov'ev V.A. Strukturnye izmeneniia v zharostoikikh pokrytiakh lopatok turbin pri ekspluatatsii [Structural changes in heat-resistant coatings of turbine blades during operation]. *Naukopark*, 2014, no. 2–2(22), pp. 51–55.

8. Kositsyn S.V., Guzanov B.N., Aleksin S.D. et al. Osobnosti struktury i svoistv ($\gamma + \beta$) spлавov Ni–Cr–Al vblizi evtekticheskogo sostava [Features of structure and properties ($\gamma + \beta$) of Ni-Cr-Al alloys near the eutectic composition]. *FMM*, 1990, no. 9, pp. 114–122.

9. Kupchenko G.V., Nesterovich L.N. Struktura i svoistva evtekticheskikh kompozitsionnykh materialov [Structure and properties of eutectic composite materials]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1986, 200 p.

10. Gorev K.V., Goretskii G.P., Kupchenko G.V. et al. Struktura i fazovye prevrashcheniia v napravlenno kristallizovannykh evtekticheskikh splavakh sistemy Ni–Cr–Al [Structure and phase transformation in Ni-Cr-Al system of directional crystallized eutectic alloys]. *Doklady Akademii nauk BSSR*, 1986, vol. 30, no. 4, pp. 334–336.

11. Diagrammy sostoianiia metallicheskih sistem [Metal system status charts]. Ed. N.V. Ageeva; VINITIE. Moscow, 1961, iss. 4, 183 p.

12. Pugacheva N.B. Sovremennye tendentsii razvitiia zharostoikikh pokrytii na osnove aluminidov zheleza, nikelia i kobal'ta [Current trends in heat-resistant coatings based on iron, nickel and cobalt aluminides]. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2015, no. 3, pp. 51–82.

13. Mовчан Б.А., Малашенко И.С. Жаростойкие покрытия, осажденные в вакууме [Heat-resistant coatings deposited in vacuum]. Kiev: Naukova dumka, 1983, 232 p.

14. Guzanov B.N., Migacheva G.N., Obabkov N.V. Razrabotka i issledovanie mnogoslownykh kombinirovannykh pokrytii vysokotemperaturnogo naznacheniiia [Development and research of multilayer combined high-temperature coatings]. *Sciences of Europe, Praha, Szech Republic*, 2017, no. 16(16), pp. 83–86.

15. Owczarski W.A. Coating and advanced ceramics systems in aircraft gas turbines. *Mater. and Soc.*, 1984, vol. 8, no 2, pp. 441–451.

16. Guzanov B.N., S.V. Kositsyn, V.P. Kuznetsov et al. Modifitsirovannoe aliumosilitsidnoe pokrytie dlia zharoprochnykh nikelevykh spлавov [Modified aluminosilicide coating for heat-resistant nickel alloys]. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov*, 1985, no. 1, pp. 21–23.

References

1. Kositsyn S.V. Splavy i pokrytiia na osnove monoaluminida nikelia [Alloys and coatings based on nickel monoaluminide]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo UrO RAN, 2000, 277 p.

17. Guzanov B.N., Kuznetsov V.P., Kositsyn S.V. et al. O vliianii kremniia na zashchitnye svoistva aluminidnykh pokrytii [On the impact of silicon on the protective properties of aluminide coatings]. *Zashchita metallov*, 1982, vol. 18, no. 1, pp. 157–159.

18. Devoino O.G., Okovityi V.V. Plazmennye teplozashchitnye pokrytiia na osnove dioksida tsirkoniia s povyshennoi termoistoikost'iu [Plasma heat protection coatings based on zirconium dioxide with increased heat resistance]. *Nauka i tekhnika*, 2015, no. 1, pp. 35–39.

19. Tarasenko Iu.P., Tsareva I.N., Berdnik O.B. et al. Struktura i fiziko-mekhanicheskie svoistva zharostoikikh gazoplamennykh pokrytii NiCr–CoAl₄/ZrO₂ dlia turbinnykh lopatok gazoturbinnykh dvigatelei [Structure and physical and mechanical properties of NiCr–CoAl₄/ZrO₂ heat-resistant gas-flame coatings for gas turbine blades of gas turbine engines]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2011, no. 3(27), pp. 164–168.

20. Lesnikov V.P., Kuznetsov V.P., Konakova I.P. Konstruirovaniye kompleksnykh zashchitnykh pokrytii dlia monokristallicheskiy okhlazhdaemykh turbinnykh lopatok sovremennykh GTD [Design of complex protective coatings for monocrystal cooled turbine blades of modern GTE]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2012, no. 3(34), pp. 211–215.

21. Miller R.A., Garlink R.G., Smialek I.L. Phase distributions in plasma – sprayed zirconia-yttria. *Americ. Ceram. Soc. Bull.*, 1983, vol. 62, no 12, pp. 1355–1358.

22. Kachanov E.B., Tamarin Iu.A. Termomekhanicheskaia ustalost' zashchitnykh pokrytii lopatok turbin [Thermo-mechanical fatigue of turbine blade protection coatings]. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2002, no. 4, pp. 122–128.

23. Guzanov B.N., Kositsyn S.V., Pugacheva N.B. Osobennosti sozdaniia i perspektivy ispol'zovaniia zashchitnykh pokrytii pri nestatsionarnom teplovom i mekhanicheskom nagruzhении [Features of creation and prospects of use of protective coverings at unsteady thermal and mechanical loading]. *Vestnik UGTU UPI. Problemy povysheniia kontaktnoi prochnosti metallicheskiy splavov*, 2004, no. 2(32), pp. 224–235.

24. Pugacheva N.B., Guzanov B.N., Obabkov N.V. Studying the structure and adhesion strength of thermal barriers coating. *13th Int. Conf. on Mechan., Recourse and Diagnostics of Materials and Struct. (MRDMS-2009)*. Ekaterinburg, 2019, vol. 2176, p. 4.

25. Markova T.V., Kryzhanovskaia I.M. Sherokhovatost' poverkhnosti: metod. Ukazaniia [Surface Roughness]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo SPbGTU, 2006, 32 p.

Получено 14.05.2020

Опубликовано 12.10.2020

Сведения об авторах

Гузанов Борис Николаевич (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, профессор, завкафедрой инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии Российского государственного профессионально-педагогического университета, e-mail: boric.guzanov @ rsvpu.ru.

Пугачева Наталья Борисовна (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории микромеханики материалов Института машиноведения Уральского отделения РАН, e-mail: nat@imach.uran.ru.

Алексеев Валерий Дмитриевич (Екатеринбург, Россия) – генеральный директор Центрального научно-исследовательского института металлургии и материалов, e-mail: sekretar@cniim-ekt.ru.

Слукин Евгений Юрьевич (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, e-mail: e.yu.slukin@urfu.ru.

About the author

Boris N. Guzanov (Yekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Engineering and Vocational Training in Mechanical Engineering and Metallurgy, Russian State Vocational-Pedagogical University, e-mail: boric.guzanov@rsvpu.ru.

Natalya B. Pugacheva (Yekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Laboratory of Micromechanics of Materials, Institute of Machine Science of the Ural Branch of the RAS, e-mail: nat@imach-uran.ru.

Valery D. Alekseev (Yekaterinburg, Russian Federation) – General Director, Central Research Institute of Metallurgy and Materials, e-mail: sekretar@cniim-ekt.ru.

Evgeny Yu. Slukin (Yekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Metal Forming, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, e-mail: e.yu.slukin@urfu.ru.