

УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-8-14

А.А. Смирнов¹, С.А. Будиновский¹**АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В СИСТЕМЕ «СПЛАВ–ПОКРЫТИЕ» В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР ДО 1200°C**

Приведены результаты анализа температурных зависимостей нормальных напряжений в поверхности тонкостенной детали из новых жаропрочных никелевых сплавов ВЖМ4, ВЖЛ21 и ВИН3 с различными жаростойкими алюминидными покрытиями разной толщины. Показано, что в области рабочих температур (1100–1200°C) для создания сжимающих напряжений в поверхности, обеспечивающих высокие термостойкость и сопротивление усталости, рекомендуется применять покрытия на основе жаростойких никелевых сплавов систем Ni–Cr–Al–Y и Ni–Al–Cr–Ta–Y с внешним слоем из моноалюминид никеля (NiAl).

Ключевые слова: многослойные жаростойкие покрытия, жаропрочные литейные никелевые сплавы, лопатки турбин, термические напряжения.

Analytical results of a temperature dependence of normal stresses in the surface of thin-walled blades made from new heat-resistant Ni-based alloys VZhM4, VZhL21 and VIN3 with various heat-resistant aluminate coatings of different thicknesses are given. It is recommended to use coatings based on heat-resistant Ni–Cr–Al–Y and Ni–Al–Cr–Ta–Y alloys with the outer layer from nickel monoaluminide (NiAl) to create compressive stresses in their surface providing high thermal stability and fatigue resistance at operating temperatures within 1100–1200°C.

Keywords: multilayer heat-resistant coatings, heat-resistant nickel alloys, turbine blades, thermal stresses.

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

Введение

Авиационным ГТД свойственны нестационарные режимы работы с многократными переходами от умеренных температур к экстремально высоким при взлете и посадке. При разработке жаростойких покрытий для рабочих лопаток турбин применяется анализ поведения системы «сплав–покрытие» с помощью математических моделей, по которым оценивается уровень различного рода напряжений, возникающих на границе раздела «сплав–покрытие» или в отдельных слоях, входящих в состав многослойных систем. В связи с этим целесообразным является применение аналитических моделей для прогнозирования ряда основных характеристик композиции «сплав–покрытие» при высоких температурах для предварительного выбора направлений разработки новых покрытий [1–4].

Данная работа посвящена выбору многослойного высокотемпературного покрытия для современных жаропрочных никелевых сплавов ВЖМ4, ВЖЛ21 и ВИН3 по результатам анализа величины и знака нормальных напряжений в поверхности тонкостенной детали на основе аналитической модели для определения упругих механических и термических напряжений в многослойной системе.

Материал и методы исследования

Аналитическим методом с помощью математической модели рассчитаны и количественно оценены величины и знаки нормальных упругих

напряжений, возникающих в процессе эксплуатации изделий из современных жаропрочных никелевых сплавов ВЖМ4, ВЖЛ21 и ВИН3 с серийными защитными конденсационно-диффузионными покрытиями разной толщины, в рабочем диапазоне температур до 1200°C. Данные жаропрочные сплавы являются разработками ВИАМ и используются в качестве материалов для изготовления турбинных лопаток ГТД:

– ВЖМ4 – сплав на основе никеля, относится к классу рений-рутениеидных монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов и предназначен для изготовления монокристаллических лопаток газовых турбин. Сплав рекомендуется к применению в общеклиматических условиях для деталей, эксплуатирующихся длительно при температурах до 1100°C, допускаются кратковременные выбросы до 1150°C [5];

– ВЖЛ21 – сплав низкой плотности на основе никеля, относится к классу литейных жаропрочных сплавов и рекомендуется для изготовления турбинных лопаток с поликристаллической структурой, работающих длительно при температурах до 1050°C, допускаются кратковременные выбросы до 1100°C;

– ВИН3 – сплав на основе никеля, относится к классу жаропрочных интерметаллидных сплавов и рекомендуется к применению в общеклиматических условиях для изготовления турбинных лопаток с монокристаллической структурой. Материал может эксплуатироваться при температурах до 1200°C, допускаются кратковременные выбросы до 1250°C [6].

Защитные покрытия позволяют повысить эксплуатационные характеристики лопаток, изготовленных из этих сплавов, и предотвратить преждевременное разрушение материала охлаждаемой лопатки, связанное со статическими, динамическими и вибрационными механическими нагрузками, в условиях экстремально высоких температур вплоть до 1200°C (материал лопатки без защитных слоев к использованию непригоден) [7–12]. Исследуемые покрытия наносятся на изделия из никелевых сплавов на промышленной ионно-плазменной установке с автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУ ТП) типа МАП-2 [13–17].

Для выбора типа и конструкции жаростойкого покрытия, работоспособного при температурах до 1200°C, применяется математическая модель для расчета нормальных напряжений в поверхностном слое (под покрытием) тонкостенной детали [18–19]:

$$(\sigma_i)_0 = \frac{E_0 \Delta T \sum_{i=1}^n E_i x_i (\alpha_i - \alpha_0)}{(1 - \mu) \left[E_0 x_0 + \left(\sum_{i=1}^n E_i x_i \right) \right]}, \quad (1)$$

где α_i – температурный коэффициент линейного расширения материала покрытия; α_0 – температурный коэффициент линейного расширения материала подложки; ΔT – разность температур до и после нагрева композиции; σ_i – напряжение в i -ом слое; E_i – модуль упругости материала i -го слоя; E_0 – модуль упругости материала подложки; μ – коэффициент Пуассона (поскольку для большинства металлов величина коэффициента Пуассона находится в пределах 0,25–0,35, принимаем ее равной 0,35); x_i – толщина i -го слоя.

С учетом изменения показателей модуля упругости и температурного коэффициента линейного расширения материала покрытия, а также модуля упругости и температурного коэффициента линейного расширения ЖС в зависимости от температуры, можно прогнозировать характер изменения упругих напряжений в поверхности подложки для выбранной конструкции покрытия с повышением температуры, а также корректировать состав и толщину слоев покрытия.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Проведен расчет температурных зависимостей нормальных упругих напряжений в поверхности подложки толщиной 1 мм из жаропрочных никелевых сплавов ВЖМ4, ВЖЛ21 и ВИНЗ с серийными жаростойкими покрытиями на основе сплавов СДП-1 (Ni–Co–Cr–Al–Y), СДП-2 (Ni–Cr–Al–Y) и ВСДП-9 (Ni–Al–Cr–Ta–Y) и внешним слоем на основе моноалюминид никеля стехиометрического состава (NiAl) и нестехиометрического состава с добавками хрома (Ni–18Al–8Cr).

При расчете напряжений с применением зависимости (1) использованы паспортные значения модуля упругости (E) и температурных коэффициентов линейного расширения (α). Значения E и α для выбранных вариантов покрытий до температуры 1100°C взяты из работ [20, 21] и затем экстраполированы до 1200°C с помощью линий тренда.

Результаты расчета напряжений для монокристаллического сплава ВЖМ4 с жаростойкими двухслойными покрытиями разной толщины представлены на рис 1. Анализ полученных зависимостей величины нормальных напряжений от температуры показывает, что композиции из сплава ВЖМ4 с покрытиями ВСДП-9+NiAl и ВСДП-9+(Ni–18Al–8Cr) с увеличением температуры демонстрируют рост сжимающих напряжений в поверхности подложки с изменением знака напряжения на растягивающие в области температур 300–500 и 600–800°C. Однако величина растягивающих напряжений достаточно мала и имеет место при низких температурах. В области рабочих температур 1000–1200°C уровень сжимающих напряжений достигает 250 МПа для покрытия ВСДП-9+NiAl и 230 МПа – для ВСДП-9+(Ni–18Al–8Cr) (см. рис. 1, а, б). Также стоит отметить зависимость уровня создаваемых нормальных сжимающих напряжений при рабочих температурах 1100–1200°C от толщины слоя ВСДП-9 и внешних алюминидных слоев NiAl и Ni–18Al–8Cr.

Рассмотрены композиции из сплава ВЖМ4 с покрытиями СДП-1+NiAl и СДП-1+(Ni–18Al–8Cr) разной толщины. Анализ полученных зависимостей величины нормальных напряжений от температуры показывает достаточно сложный характер изменения напряжений (см. рис. 1, в, г). Стоит отметить скачкообразный рост растягивающих напряжений в области температур 600–800°C, которые для толщины слоя СДП-1, равной 100 мкм, достигают 90 МПа при 800°C. Подобные изменения связаны с фазовыми превращениями, происходящими в сплавах типа СДП-1, где при температурах ниже рабочей может присутствовать σ -фаза (CoCr). До 900°C для сплава характерна многофазная структура ($\beta+\gamma+\gamma'+\alpha$) с присутствием σ -фазы. С ростом температуры происходят фазовые превращения с формированием в сплаве двухфазной структуры ($\beta+\gamma$), которая сохраняется до 1150°C и более. С уменьшением толщины слоя СДП-1 величина нормальных напряжений значительно меняется, но неизменным остается их знак. После 900°C нормальные напряжения меняют знак с растягивающих на сжимающие, но в области рабочих температур (1100–1200°C) происходит повторная смена знака напряжений на растягивающие вплоть до 1200°C. Особенно ярко это выражено на графике для покрытия СДП-1 толщиной 100 мкм.

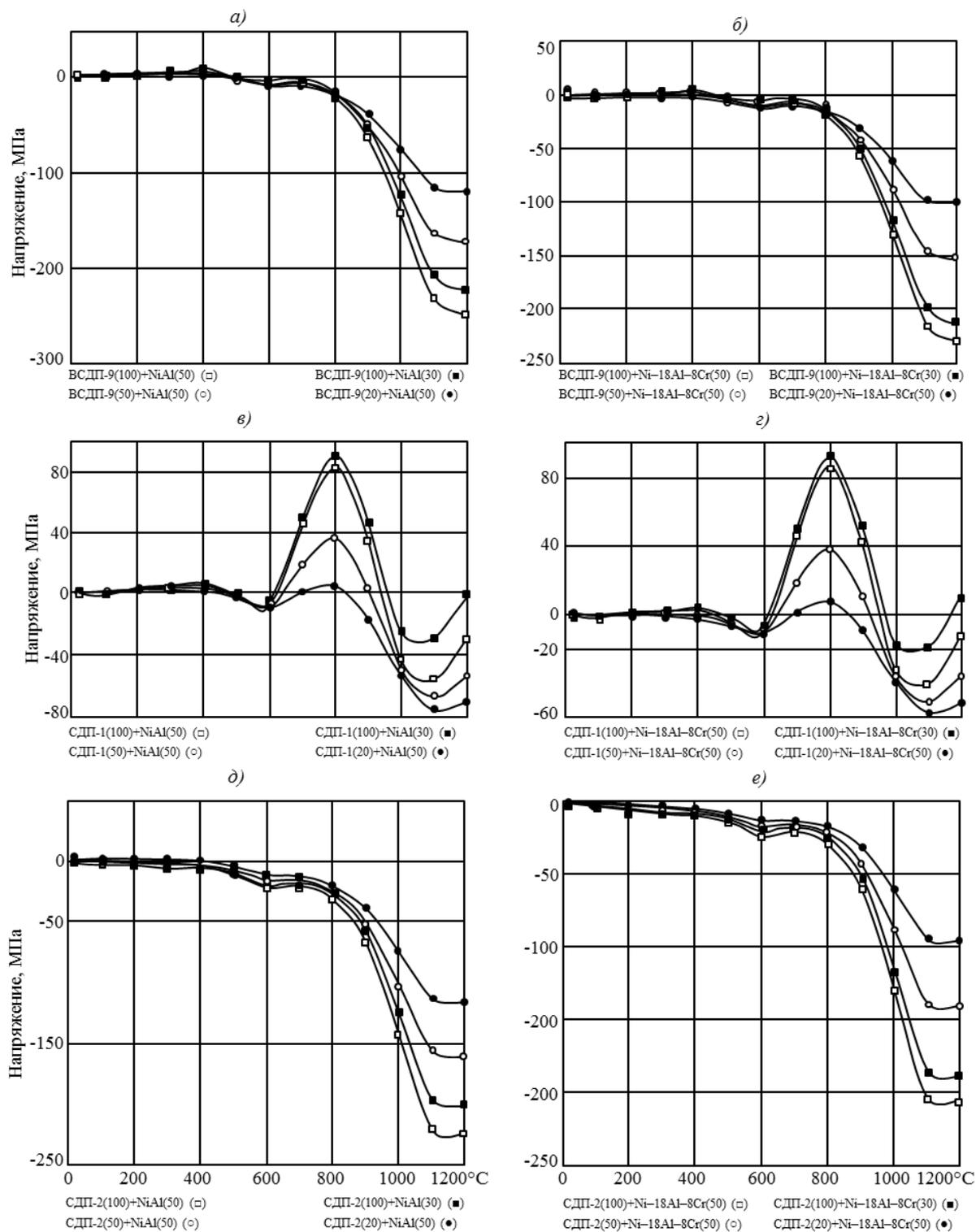


Рис. 1. Зависимости нормальных упругих напряжений в поверхности подложки из жаропрочного никелевого сплава ВЖМ4 с покрытиями ВСДП-9+NiAl (а); ВСДП-9+(Ni-18Al-8Cr) (б); СДП-1+NiAl (в); СДП-1+(Ni-18Al-8Cr) (г); СДП-2+NiAl (д); СДП-2+(Ni-18Al-8Cr) (е) различной толщины (мкм) от температуры

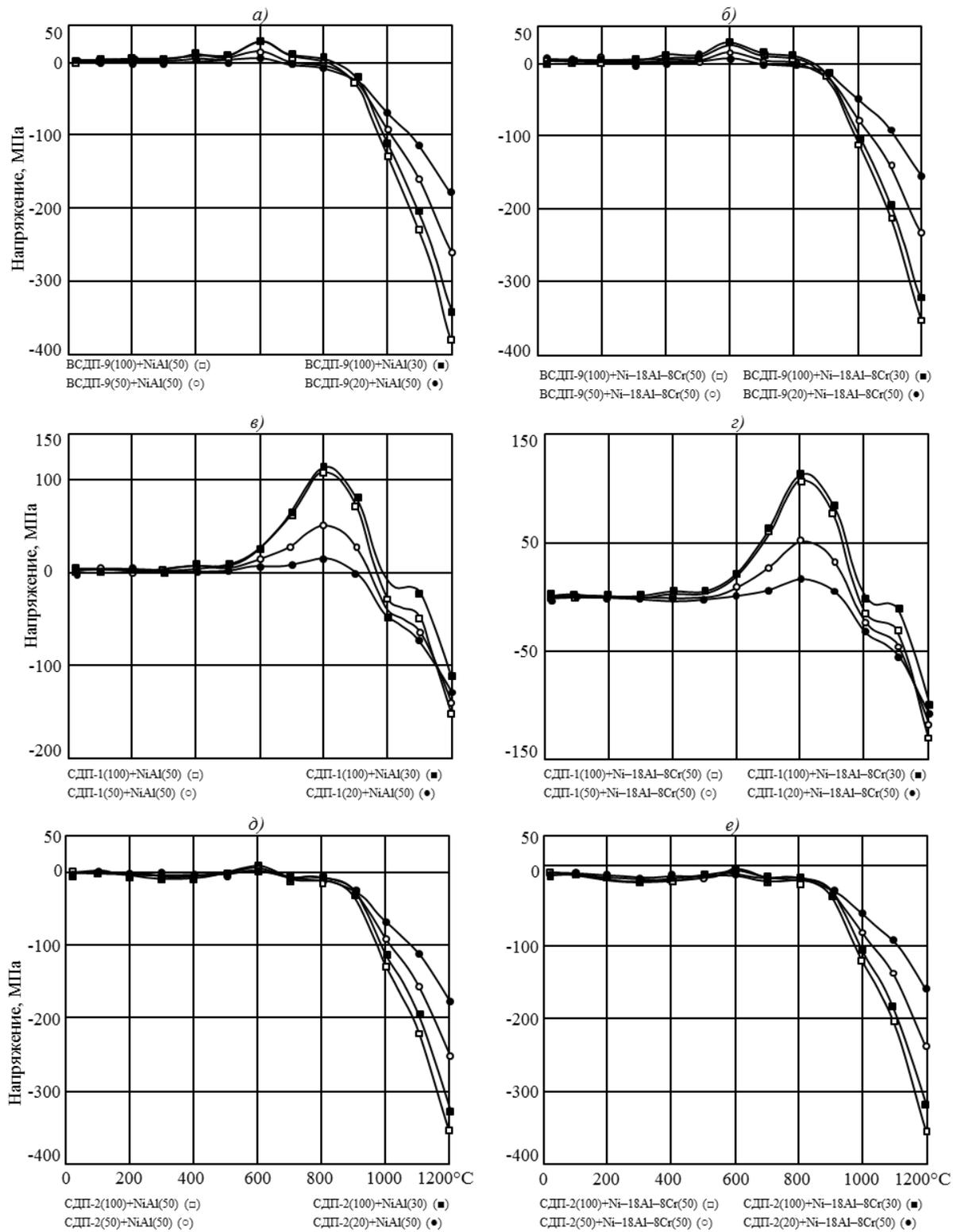


Рис. 2. Зависимости нормальных упругих напряжений в поверхности подложки из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ21 с покрытиями BSДП-9+NiAl (а); BSДП-9+(Ni-18Al-8Cr) (б); СДП-1+NiAl (в); СДП-1+(Ni-18Al-8Cr) (г); СДП-2+NiAl (д); СДП-2+(Ni-18Al-8Cr) (е) различной толщины (мкм) от температуры

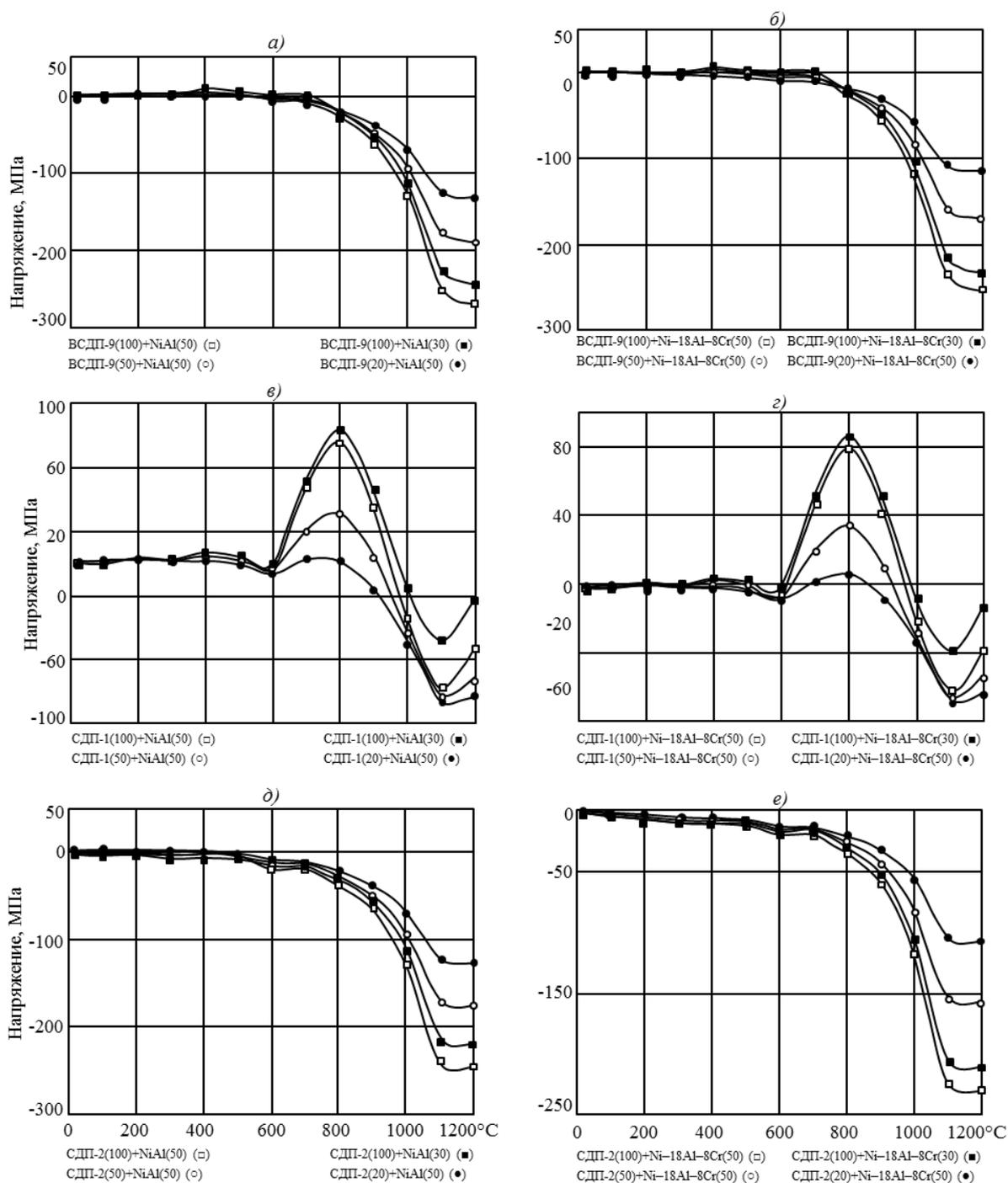


Рис. 3. Зависимости нормальных упругих напряжений в поверхности подложки из жаропрочного никелевого сплава ВИНЗ с покрытиями ВСП-9+NiAl (а); ВСП-9+(Ni-18Al-8Cr) (б); СДП-1+NiAl (в); СДП-1+(Ni-18Al-8Cr) (г); СДП-2+NiAl (д); СДП-2+(Ni-18Al-8Cr) (е) различной толщины (мкм) от температуры

Композиции сплава ВЖМ4 с покрытиями из сплава СДП-2 с NiAl и Ni-18Al-8Cr разной толщины представлены на рис. 1, *д*, *е*. Характер изменения нормальных напряжений с ростом температуры схож для всех рассмотренных толщин внешнего алюминидного слоя, но имеет количественную разницу в уровне создаваемых сжимающих напряжений. При температурах 0–400°C нормальные напряжения являются практически нулевыми, далее наблюдается увеличение уровня сжимающих напряжений вплоть до 600°C. В температурном диапазоне 600–700°C происходят смена знака и небольшой рост растягивающих напряжений. Далее с 700 до 1100°C сжимающие напряжения возрастают и достигают своего максимума: 225 и 210 МПа – для композиций СДП-2 (100 мкм)+NiAl (50 мкм) и СДП-2 (100 мкм)+(Ni-18Al-8Cr (50 мкм)).

Результаты расчета напряжений для сплава ВЖЛ21 с жаростойкими двухслойными покрытиями разной толщины представлены на рис. 2. Анализ полученных зависимостей величины нормальных напряжений от температуры показывает, что композиции из сплава ВЖЛ21 с покрытиями ВСДП-9+NiAl и ВСДП-9+(Ni-18Al-8Cr) при температуре от 0 до 300°C характеризуются нулевыми напряжениями, от 300 до 600°C – напряжения растяжения достигают 25 МПа, от 600 до 1200°C – происходит плавный рост напряжений сжатия, значения которых достигают 360–370 МПа для покрытий ВСДП-9 (100 мкм)+NiAl (50 мкм) и ВСДП-9 (100 мкм)+(Ni-18Al-8Cr (50 мкм)) (см. рис. 2, *а*, *б*).

Зависимости нормальных упругих напряжений от температуры для композиций из сплава ВЖЛ21 с покрытиями СДП-1+NiAl и СДП-1+(Ni-18Al-8Cr) разной толщины представлены на рис. 2, *в*, *г*. До 300°C напряжения равны нулю, от 300 до 800°C – растут напряжения растяжения, достигая 115 МПа для покрытий СДП-1 (100 мкм)+NiAl (50 мкм) и СДП-1 (100 мкм)+(Ni-18Al-8Cr (50 мкм)). От 800 до 1000°C напряжения релаксируют до нулевых значений, и начинается рост напряжений сжатия, значения которых достигают 150 МПа при 1200°C.

Зависимости нормальных упругих напряжений от температуры для композиций из сплава ВЖЛ21 с покрытиями СДП-2+NiAl и СДП-2+(Ni-18Al-8Cr) разной толщины представлены на рис. 2, *д*, *е*. Напряжения практически равны нулю до 800°C, имеют место изменение знака и незначительные изменения уровня нормальных напряжений. От 800 до 1200°C растут напряжения сжатия, достигая 365 и 350 МПа для покрытий СДП-2 (100 мкм)+NiAl (50 мкм) и СДП-2 (100 мкм)+(Ni-18Al-8Cr (50 мкм)) соответственно.

Результаты расчета напряжений для жаропрочного интерметаллидного сплава ВИН3 с жаростойкими двухслойными покрытиями разной толщины представлены на рис. 3. Анализ получен-

ных зависимостей величины нормальных напряжений от температуры показывает, что композиции из сплава ВИН3 с покрытиями ВСДП-9+NiAl и ВСДП-9+(Ni-18Al-8Cr) при температурах до 700°C характеризуются почти нулевыми напряжениями, от 700 до 1200°C – происходит плавный рост напряжений сжатия, значения которых достигают 270 и 250 МПа для покрытий ВСДП-9 (100 мкм)+NiAl (50 мкм) и ВСДП-9 (100 мкм)+(Ni-18Al-8Cr (50 мкм)) соответственно (см. рис. 3, *а*, *б*).

Зависимости нормальных упругих напряжений от температуры для композиций из сплава ВИН3 с покрытиями СДП-1+NiAl и СДП-1+(Ni-18Al-8Cr) разной толщины представлены на рис. 3, *в*, *г*. До 600°C напряжения практически равны нулю, от 600 до 800°C – растут напряжения растяжения, достигая 85 МПа для покрытий СДП-1 (100 мкм)+NiAl (50 мкм) и СДП-1 (100 мкм)+(Ni-18Al-8Cr (50 мкм)). От 800 до 1000°C напряжения релаксируют до нулевого значения, и начинается рост напряжений сжатия, максимум которых достигается при 1100°C и составляет 90 и 70 МПа для покрытий СДП-1 (20 мкм)+NiAl (50 мкм) и СДП-1 (20 мкм)+(Ni-18Al-8Cr (50 мкм)) соответственно.

Зависимости нормальных упругих напряжений от температуры для композиций из сплава ВИН3 с покрытиями СДП-2+NiAl и СДП-2+(Ni-18Al-8Cr) разной толщины представлены на рис. 3, *д*, *е*. Напряжения практически нулевые до 500°C – для покрытия СДП-2+NiAl и до 200°C – для покрытия СДП-2+(Ni-18Al-8Cr). Затем до 1100°C наблюдается рост напряжений сжатия, которые достигают 250 и 230 МПа для покрытий СДП-2 (100 мкм)+NiAl (50 мкм) и СДП-2 (100 мкм)+(Ni-18Al-8Cr (50 мкм)) соответственно.

Таким образом, анализ эволюции нормальных упругих напряжений, возникающих в поверхности никелевых сплавов ВЖМ4, ВЖЛ21 и ВИН3 для рабочих лопаток турбин под жаростойкими алюминидными покрытиями, позволяет сделать следующие выводы:

- покрытия СДП-2+NiAl и ВСДП-9+NiAl обеспечивают создание в поверхности подложки из сплавов ВЖМ4, ВЖЛ21 и ВИН3 сжимающих напряжений при рабочих температурах 1000–1200°C, характерных для турбин высокого давления современных авиационных ГТД;

- серийное многокомпонентное конденсированное покрытие типа СДП-1 не рекомендуется для применения в области высоких температур, так как в силу особенностей своего элементного и фазового состава стимулирует увеличение растягивающих нормальных напряжений в поверхности защищаемого сплава с ростом температуры в области 600–800°C;

- показано преимущество формирования на поверхности покрытия слоя моноалюминид никеля стехиометрического состава (NiAl) по сравнению с нестехиометрическим составом с добавками

хрома (Ni-18Al-8Cr). В среднем для всех сплавов с выбранными покрытиями СДП-2 и ВСДП-9 уровень нормальных упругих напряжений, создаваемых в процессе эксплуатации материала с покрытиями при рабочих температурах 1000–1200°C, с внешним слоем из NiAl, был на 25 МПа выше, чем при использовании внешнего слоя из

Ni-18Al-8Cr. Также данные значения показывают, каков будет уровень напряжений в покрытии при его длительной эксплуатации, если слой покрытия будет обеднен Al из-за неизбежных диффузионных процессов взаимодействия материала основы сплава с нанесенным конденсационно-диффузионным слоем покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ray A.K. Crack propagation studies and bond coat properties in thermal barrier coatings under bending // *Bulletin Material Science*. 2001. V. 24. №2. P. 203–209.
2. Moskal G. Measurement of residual stress in plasma-sprayed TBC with a gardient of porosity and chemical composition // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2007. V. 23. №2. P. 31–34.
3. Hsueh C.H., Fuller E.R. Analytical modeling of oxide thickness effects on residual stresses in thermal barrier coatings // *Scripta materials*. 2000. V. 42. №8. P. 781–787.
4. Taymaz I. Comparison of thermal stresses developed in Al₂O₃-SG, ZrO₂-(12% Si+Al) and ZrO₂-SG thermal barrier coating systems with Ni-Al, Ni-Cr-Al-Y and Ni-Co-Cr-Al-Y interlayer materials subjected to thermal loading // *Surface and Coatings Technology*. 1999. №116–119. P. 690–693.
5. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонин И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 36–52.
6. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 57–60.
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. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Нанослойные упрочняющие покрытия для защиты стальных и титановых лопаток компрессора ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №3. С. 3–8.
10. 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 ЖС36ВИ // *МиТОМ*. 2011. №1. С. 34–40.
11. Гаямов А.М. Жаростойкое покрытие с композиционным барьерным слоем для защиты внешней поверхности рабочих лопаток ГТД из ренийсодержащих жаропрочных никелевых сплавов // В сб. XI Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». М.: ИМЕТ РАН. 2012. С. 473–475.
12. Мубояджян 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. №S. С. 71–81.
13. 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.
14. Способ обработки поверхности металлического изделия: пат. 2368701 Рос. Федерация; опубл. 27.09.2009.
15. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Металлы*. 2012. №1. С. 5–13.
16. Способ нанесения комбинированного жаростойкого покрытия: пат. 2402633 Рос. Федерация; опубл. 31.03.2009.
17. 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.
18. Будиновский С.А., Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Применение аналитической модели определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для рабочих лопаток авиационных турбин // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. 2011. №SP2. С. 26–37.
19. Будиновский С.А. Применение аналитической модели определения упругих механических и термических напряжений в многослойной системе в решении задач по созданию жаростойких алюминидных покрытий // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2013. №3. С. 3–11.
20. Забродина Н.В. Сплавы на основе алюминидов никеля для защитных конденсационных покрытий лопаток турбин авиационных ГТД: Автореф. дис. к.т.н. М.: ВИАМ. 1988. 26 с.
21. Haynes J.A., Pint B.A., Wright I.G. Comparison of thermal expansion and oxidation behavior of various high-temperature coating materials and superalloys // *Materials at high temperatures*. 2004. №21(2). P. 87–94.