

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ХРОМОАЛИТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ ГАЗОЦИРКУЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ****В.Н. Симонов, М.В. Унчикова, С.А. Пахомова**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

e-mail: Simonov_vn@mail.ru; Unchikova_mv@mail.ru

В качестве покрытий, широко применяемых для защиты внутренних полостей рабочих лопаток современных газотурбинных двигателей, рассмотрены хромоалитированные покрытия, полученные газоциркуляционным методом. Установлено, что состав лигатуры и остаточное давление воздуха в установке существенно влияют на эксплуатационные свойства и качество покрытий. Определены условия совместного массопереноса хрома и алюминия к поверхности деталей, что позволило заменить двухстадийный процесс последовательно осаждения элементов более экономичным одностадийным. Показано, что остаточное давление воздуха в установке перед началом процесса насыщения влияет на число оксидных частиц Al_2O_3 в покрытии, являющихся концентраторами термических напряжений в процессе эксплуатации охлаждаемых лопаток. С помощью компьютерного моделирования проанализировано влияние размера и формы частиц на значение термических напряжений. Термодинамическим расчетом обоснована и экспериментально подтверждена возможность полного предотвращения образования оксида алюминия в покрытии в случае использования никель-иттриевой лигатуры.

Ключевые слова: жаростойкость, совместный массоперенос, оксид алюминия, термические напряжения, остаточное давление, геттер кислорода.

**QUALITY IMPROVEMENT OF CHROME-CALORIZING COATINGS,
OBTAINED WITH GAS-CIRCULATING****V.N. Simonov, M.V. Unchikova, S.A. Pakhomova**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

e-mail: Simonov_vn@mail.ru; Unchikova_mv@mail.ru

In this paper we examine chrome-calorizing coatings obtained with the gas-circulating method. They are widely used for protecting the interior cavity of working blades in modern gas-turbine engines. The findings of the research illustrate that the alloy composition and residual air pressure in the installation have an essential influence on operational properties and coatings quality. We determined the conditions of combined chrome and aluminium mass transfer to the surface of the component. Consequently, it became possible to replace the two-stage consistent elements precipitation with the more economical one-stage process. Within the research we found out, that residual air pressure in the installation before the saturation process has an effect on the quantity of oxide Al_2O_3 particles in the coatings. By means of computer simulation, we analyzed the effect that the particles, their size and form have on the thermal stress in the exploitation process of the cooled blades. Moreover, by thermodynamic calculations, we substantiated and experimentally confirmed the possibility of a complete prevention of forming aluminum oxide in the coating in case of using nickel yttrium alloys.

Keywords: heat resistance, combined mass transfer, aluminium oxide, thermodynamical stress, residual pressure, oxygen getter.

Повышение эффективности современных газотурбинных двигателей (ГТД) связано не только с разработкой жаропрочных материалов, но и с понижением температуры рабочих лопаток за счет совершенствования системы охлаждения указанных деталей. Каналы в стенке охлаждаемых лопаток состоят из множества перемычек, формирующих поток охлаждающего воздуха и обеспечивающих жесткость конструкции. Наружные поверхности лопаток ГТД контактируют с продуктами сгорания топлива, внутренние — с высокотемпературным скоростным воздушным потоком, таким образом, для обеспечения требуемого ресурса работы деталей необходима защита от газовой коррозии не только наружных, но и внутренних поверхностей рабочих лопаток.

Если наружные поверхности защищают, как правило, многокомпонентными ионно-плазменными покрытиями, то для внутренних полостей применяют жаростойкие алитированные или хромоалитированные диффузионные покрытия [1]. Хром в количестве 5...6% значительно повышает жаростойкость и улучшает физико-механические свойства алюминидов никеля, поэтому в современных ГТД хромоалитирование находит все более широкое применение.

Сложная конфигурация внутренних каналов затрудняет или делает невозможным применение некоторых методов нанесения покрытий, вследствие чего в настоящее время для защиты внутренних поверхностей используют порошковую или газоциркуляционную технологии. Сравнительно простой по техническим условиям реализации порошковый метод имеет существенные недостатки. Это трудоемкий, энергоемкий, плохо управляемый процесс [2]. Гигроскопичность порошка и присутствие влаги вызывают образование оксида алюминия, частицы которого врастают в покрытие, вызывают его преждевременное разрушение и снижают качество диффузионного слоя. Кроме того, в узких каналах проявляется фактор недостаточного объема активной массы порошковой смеси для получения требуемой поверхностной концентрации алюминия и толщины покрытия [3]. В связи с этим газоциркуляционный метод является безальтернативным для защиты от газовой коррозии внутренних полостей рабочих лопаток современных ГТД [4].

В рабочей камере циркуляционной установки предусмотрено раздельное расположение насыщаемых деталей и материалов, содержащих диффундирующие элементы, массоперенос которых происходит вследствие перепада парциальных давлений летучих галоидных соединений и образования самовосстанавливающейся газовой среды [5], скорость движения которой регулируют с помощью вентилятора. Создание разряжения в установке перед началом процесса позволяет предотвратить образование частиц оксида алюминия и гарантировать по-

лучение качественных покрытий. Основными технологическими параметрами, определяющими структуру и свойства покрытия, являются активность лигатуры, температура и продолжительность процесса, тип галлоидного активатора, остаточное давление воздуха в установке. В настоящее время разработан двухстадийный процесс хромоалитирования с последовательным осаждением элементов покрытия [6]. Более экономичным является одностадийный процесс [7], который реализуется при оптимальных технологических параметрах, обеспечивающих условия совместного массопереноса алюминия и хрома.

Цель работы — совершенствование одностадийного процесса хромоалитирования и определение значений технологических параметров, позволяющих предотвратить образование оксида алюминия в покрытии.

Материал и методика исследований. Условия совместного массопереноса насыщающих элементов при газоциркуляционном методе выбирали на основе термодинамического расчета состава газовой среды в зависимости от соотношения алюминия и хрома в лигатуре. Изменение состава лигатуры влияет на активность присутствующих компонентов, парциальные давления галогенидов алюминия и хрома и, следовательно, интенсивность массопереноса элементов покрытия к насыщаемой поверхности. Термодинамические расчеты выполняли с использованием программы Terra [8, 9] при следующих соотношениях хрома и алюминия в сплаве: Al:Cr = 1:1, 2:3, 3:7, 1:4. Значения термодинамической активности компонентов в хромоалюминиевых сплавах определены в работе [10]. В качестве галлоидного активатора был выбран хлорид никеля NiCl_2 , который для исключения возможности попадания влаги в рабочее пространство газоциркуляционной установки предварительно отжигали в камерной печи при температурах 175, 250 и 500 °С с выдержкой 8 ч при каждой температуре. Исследования по нанесению хромоалитированных покрытий проводили на лабораторной установке УЦЛ-1. В качестве лигатуры использовали специально выплавленные хромоалюминиевые сплавы, состав которых по результатам термодинамического расчета приводит к одновременному образованию хлоридов, как алюминия, так и хрома. Покрытия наносили на цилиндрические образцы из литейного никелевого сплава ЖС6У диаметром 10 мм и высотой 20 мм.

После загрузки активатора, образцов и лигатуры, которую предварительно дробили на гранулы диаметром 10...20 мм, из установки откачивали воздух до разряжения порядка 20 Па. Температура и продолжительность процесса хромоалитирования составляли соответственно 1000 °С и 4 ч. По окончании процесса образцы охлаждали вместе с печью до 200 °С и извлекали из установки. После хромоалитирования для повышения пластичности покрытия за счет умень-

шения поверхностной концентрации алюминия и формирования двухфазной структуры β -NiAl- γ' -Ni₃Al проводили термовакуумную обработку при температуре 1210 °С и выдержке 1,15 ч.

Структуру хромоалитированных покрытий исследовали металлографическим, рентгеноструктурным и микрорентгеноспектральным методами.

Металлографические исследования выполняли на микроскопе METAMPB-21 при увеличении $\times 500$. Фазовый состав определяли на приборе Дрон-3 в кобальтовом излучении. Распределение элементов по диффузионному слою изучали методом рентгеноспектрального микроанализа на приборе JOELJSM-5600.

В рамках разработки процесса одностадийного хромоалитирования были проведены исследования по оценке влияния технологических параметров на возможность образования оксида алюминия в покрытии. На основе термодинамического расчета, выполненного с помощью программы Terra, рассмотрено влияние остаточного давления воздуха в установке и проанализирована возможность применения в качестве геттера кислорода никель-иттриевого сплава.

Для установления влияния формы и размера включений оксида алюминия на распределение термических напряжений в покрытии при охлаждении лопатки в интервале 1000...20 °С использовано компьютерное моделирование. В среде Autodesk Invention 10 была построена геометрическая модель, позволяющая рассматривать оксиды в покрытии как “отдельные детали конструкции” с определенными физико-механическими свойствами.

При построении геометрической модели покрытия с частицами оксида алюминия (рис. 1), представляющей по форме прямоугольный параллелепипед, исходили из следующих допущений:

- оксиды образуются на границе покрытие–сплав;

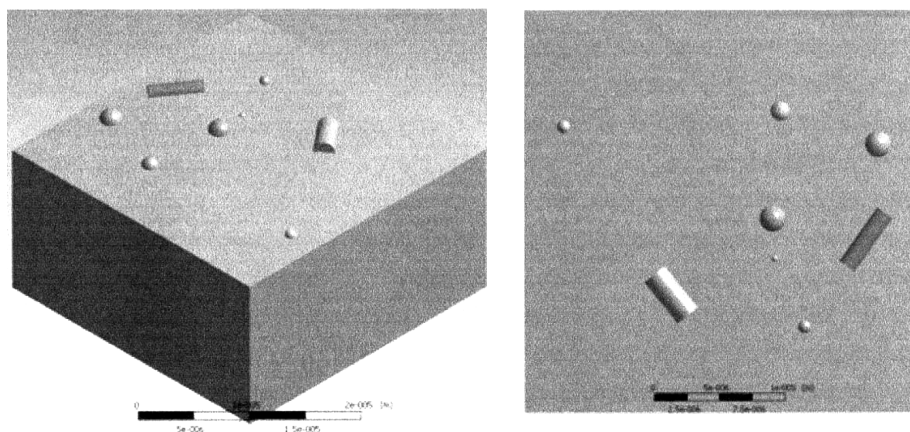


Рис. 1. Геометрическая модель покрытия с частицами оксидов алюминия сферической и цилиндрической форм

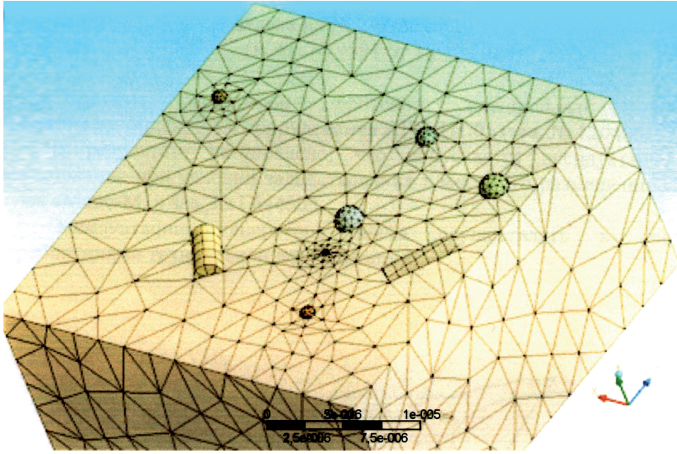


Рис. 2. Разбиение модели на конечные элементы

- толщина покрытия, имеющего структуру β -NiAl, составляет 30 мкм;
- на поверхности площадью 900 мкм² образуются восемь включений оксида, причем два — цилиндрической формы с радиусом основания 0,5 и 1 мкм и длиной 4 и 5 мкм и шесть включений сферической формы с радиусом 0,25, 0,5, 0,75 и 1 мкм. Расстояние между частицами составляет от 4 до 15 мкм.

Геометрическую модель экспортировали в расчетный комплекс ANSYS, с помощью которого отклик системы на изменение температуры получали в виде трехмерной визуализации полей температурного и термических напряжений [11]. ANSYS позволяет выполнять расчеты методом конечных элементов (КЭ). С помощью модуля Design Modeler проведена генерация единой сетки с КЭ, различающимися по форме, плотности и размерам (рис. 2). Для повышения точности расчетов размеры КЭ были уменьшены вблизи оксидных частиц.

Определение термических напряжений в покрытии проводилось последовательно в два этапа: на начальном этапе рассчитывали температуры в узлах сетки, на втором — анализировали напряженное состояние.

Распределение температуры было получено в результате решения задачи одномерного нестационарного теплообмена в системе охлаждающая среда–покрытие–сплав. Дифференциальное уравнение теплопроводности, устанавливающее связь между температурой, временем и координатами элементарного объема, в данном случае имеет вид

$$\frac{dt}{d\tau} = a \frac{d^2t}{dx^2}$$

где a — коэффициент температуропроводности.

Полагали, что охлаждающая среда имеет постоянную температуру 20°C , тепловой поток направлен перпендикулярно покрытию, теплообмен между внешней средой и покрытием происходит при граничных условиях третьего рода в результате конвекции и описывается уравнением Ньютона – Рихмана, теплообмен между покрытием и сплавом, покрытием и частицами оксида происходит за счет теплопроводности:

$$dQ = \alpha(t_{00, \text{cp}} - t_{\text{пов}})dS d\tau,$$

где $t_{00, \text{cp}}$, $t_{\text{пов}}$ – температуры охлаждающей среды и поверхности; α – коэффициент теплоотдачи; dQ – количество теплоты, которое отводится от поверхности dS за время $d\tau$.

Коэффициент теплоотдачи выбирали для вынужденного турбулентного движения охлаждающего влажного воздуха при средней температуре 500°C . В начальный момент времени полагали, что температура равномерно распределяется в рассчитываемой системе и составляет 1000°C .

В качестве исходных данных для расчета вводили следующие физико-механические свойства покрытия (фазы NiAl), оксида (Al_2O_3), сплава ЖС6У: модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициенты теплопроводности и линейного расширения, значения которых выбирали для начальной (1000°C) и средней температур цикла охлаждения.

Результаты исследований и обсуждение. Основным технологическим параметром, позволяющим реализовать процесс одностадийного хромоалитирования является состав лигатуры. В результате ранее проведенных исследований [2] установлено, что насыщение поверхности деталей алюминием и хромом в хлоридной среде происходит за счет массопереноса элементов галогенидами AlCl_2 , AlCl и CrCl_2 , CrCl и протекания следующих реакций диспропорционирования:



Термодинамические расчеты показали, что ввиду меньшего по сравнению с алюминием сродства хрома к хлору образование соединений CrCl_2 и CrCl происходит менее активно и, следовательно, требуемая концентрация элемента в покрытии может быть получена при использовании лигатуры, в которой содержится не менее 50% Cr. Конкретизировать состав лигатуры вследствие многофакторности процесса формирования диффузионного слоя можно только на основе обобщения экспериментальных данных по структуре и толщине покрытий.

Результаты эксперимента (табл. 1, рис. 3, *а*) показали, что жаростойкая фаза β -NiAl с концентрацией алюминия 25...32% образуется во всем рассматриваемом интервале изменения состава хромоалюминиевого сплава, однако оптимальное содержание хрома в покрытии 5...5,5% достигается лишь при соотношении Al:Cr = 1:1. Увеличение содержания хрома в лигатуре сопровождается уменьшением поверхностной концентрации алюминия и при соотношении Al:Cr = 1:4 она снижается до значения 6,7%, что соответствует γ' -фазе с невысокой жаростойкостью.

Таблица 1

Влияние состава хромоалюминиевой лигатуры на структуру внешнего слоя покрытия

| Состав лигатуры, масс. % | | Фазовый состав покрытия |
|--------------------------|----|--|
| Cr | Al | |
| 50 | 50 | β -NiAl |
| 60 | 40 | β -NiAl |
| 70 | 30 | β -NiAl |
| 80 | 20 | γ' -Ni ₃ Al + α -Cr |
| 90 | 10 | α -Cr |

Состав хромоалюминиевого сплава влияет и на толщину покрытия (рис. 3, *б*). Увеличение содержания хрома, имеющего более низкую диффузионную подвижность по сравнению с алюминием, уменьшает толщину покрытия от 39 мкм при отношении Al:Cr = 1:1 до 8 мкм при отношении Al:Cr = 1:4.

По результатам экспериментов для проведения одностадийного процесса хромоалитирования выбрали состав лигатуры 50% Al–50% Cr. Покрытие в этом случае имеет двухслойную структуру

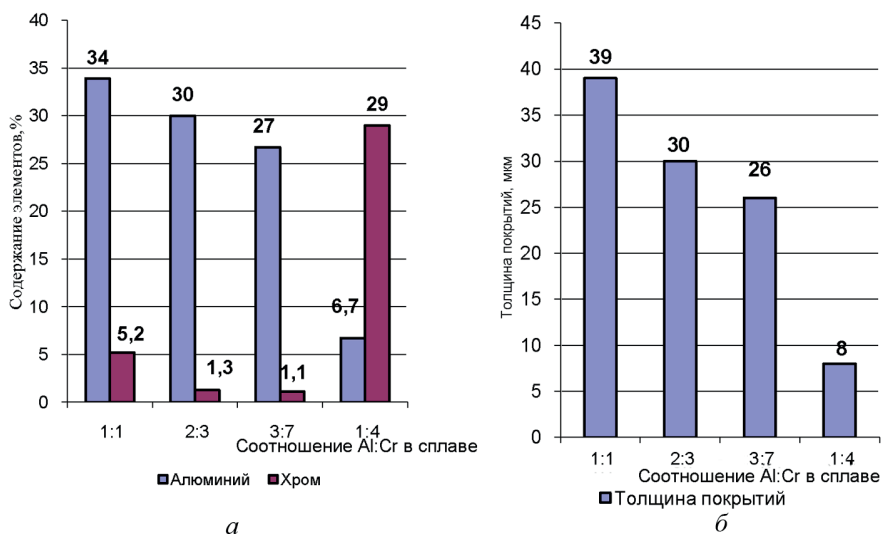


Рис. 3. Поверхностная концентрация алюминия и хрома (*а*) и толщина покрытий (*б*) в зависимости от соотношения компонентов в хромоалюминиевой лигатуре

(рис. 4, *a*): внешний слой состоит из β -NiAl с концентрацией алюминия до 34 % и хрома до 5... 5,5 %, внутренний слой многофазный. Кроме фазы β -NiAl он содержит также карбиды хрома, молибдена и вольфрама.

Применение термовакуумной обработки согласно результатам металлографического и микрорентгено-спектрального анализов привело к уменьшению поверхностной концентрации алюминия до 17... 18,5 % и формированию требуемой двухфазной β -NiAl + γ' -Ni₃Al структуры внешнего слоя с отдельными включениями дисперсных частиц α -Cr (рис. 4, *б*). Внутренний слой с концентрацией 9,2 % Al состоит из фазы β -NiAl и карбидов.

В целях совершенствования технологии газоциркуляционного метода и повышения эксплуатационных характеристик покрытий было проанализировано влияние остаточного давления воздуха в установке на число образующегося оксида алюминия. Расчеты показали (табл. 2), что с понижением давления воздуха количество Al₂O₃ уменьшается и при давлении 0,3 Па составляет около 10⁻⁶ мол. Дальнейшее снижение давления воздуха практически не влияет на содержание оксида алюминия.

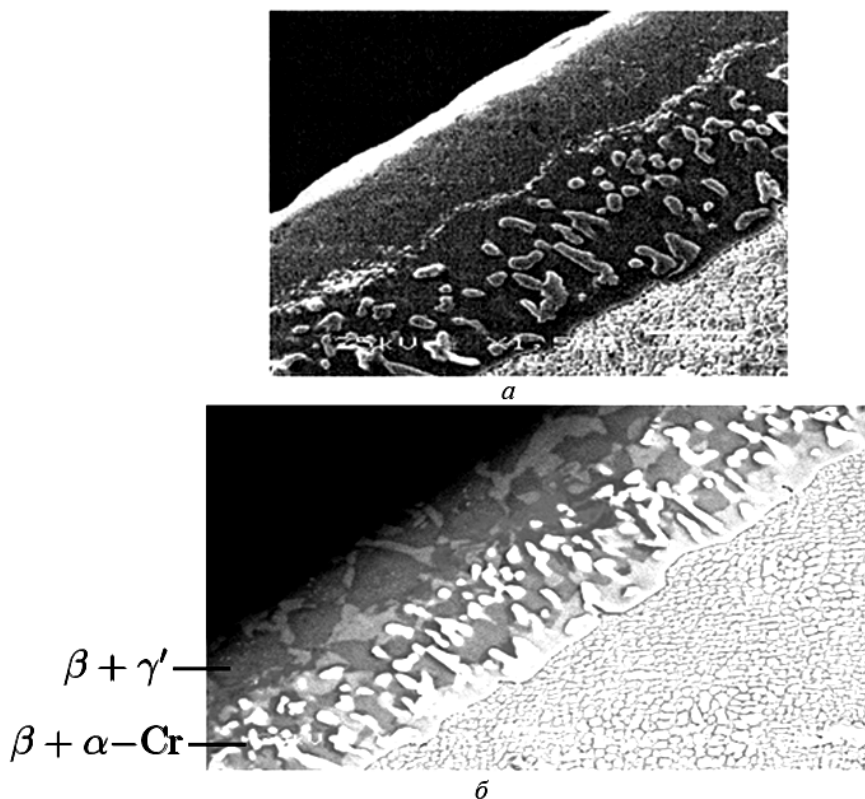


Рис. 4. Микроструктура покрытия на сплаве ЖС6У после циркуляционного одностадийного хромоалитирования ($\times 500$) (*a*), хромоалитирования и ТВО (*б*): $T = 1210^\circ\text{C}$, $\tau = 1,15\text{ ч}$ ($\times 400$)

Влияние остаточного давления и температуры процесса на количество Al_2O_3

| Давление, Па | Содержание оксида Al_2O_3 , моль/кг при температуре, К | | |
|--------------|--|----------------------|----------------------|
| | 1200 | 1300 | 1400 |
| 0,03 | $4,56 \cdot 10^{-6}$ | $4,56 \cdot 10^{-6}$ | $4,56 \cdot 10^{-6}$ |
| 0,3 | $4,56 \cdot 10^{-6}$ | $4,56 \cdot 10^{-6}$ | $4,56 \cdot 10^{-6}$ |
| 3 | 0,000224 | 0,000224 | 0,000119 |
| 30 | 0,004533 | 0,004364 | 0,001667 |
| 300 | 0,045165 | 0,045165 | 0,044885 |

Вместе с тем, присутствие частиц оксида в покрытии согласно результатам компьютерного моделирования крайне нежелательно.

Анализ распределения температуры в покрытии после охлаждения в течение 1 с (рис. 5) показывает, что резкое уменьшение температуры до $500^\circ C$ не привело к появлению значительного температурного градиента. Перепад температуры в рассматриваемом сечении незначителен, составляет сотые и тысячные доли градуса и поэтому не может быть причиной термических напряжений.

Вместе с тем, согласно анализу поля термических напряжений (рис. 6) оксидные частицы являются опасными концентраторами напряжений вследствие существенного различия коэффициентов термического расширения фазы β -NiAl покрытия и оксида Al_2O_3 . Термические напряжения, как следует из рис. 6, зависят от формы включений оксида, пропорциональны геометрическим размерам частиц и изменяются в зависимости от указанных параметров в диапазоне 55 Па. . . 10 МПа. Максимальные термические напряжения возникают вокруг крупных цилиндрических частиц.

Для исключения возможности образования оксидных частиц в покрытии и более глубокой очистки рабочей газовой среды от окислителей целесообразно применение активных геттеров кислорода, одним из которых является иттрий. Согласно результатам термодинамическо-

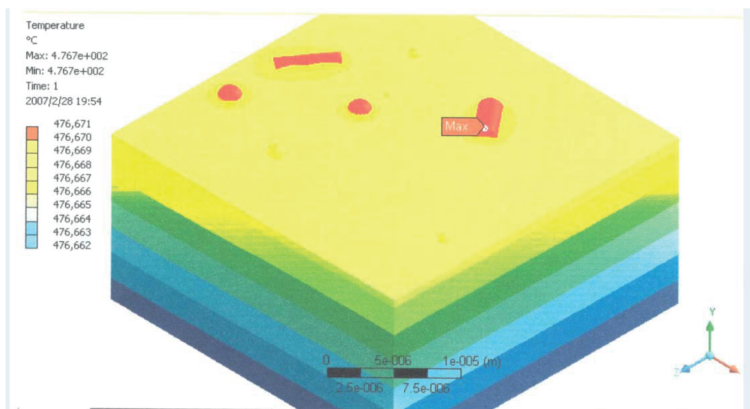


Рис. 5. Влияние частиц оксида алюминия на температурное поле

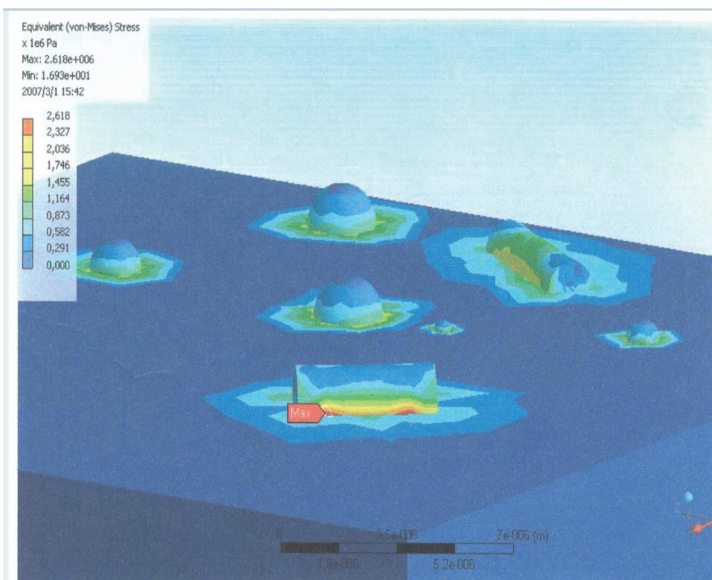


Рис. 6. Влияние частиц оксида алюминия на распределение термических напряжений

го расчета, иттрий в количестве 0,01 моля полностью удаляет кислород, связывая его в оксид Y_2O_3 . В связи с этим при проведении хромоалитирования циркуляционным способом в качестве геттера кислорода использовали никель-иттриевый сплав, который загружали в установку перед началом каждого процесса.

Выводы. На основании термодинамического расчета показано, что проведение одностадийного процесса хромоалитирования возможно при выборе такого состава лигатуры, который обеспечивает одновременное присутствие хлоридов элементов покрытия в газовой среде в количестве, достаточном для формирования требуемой структуры на поверхности детали. Установлено, что одностадийный процесс хромоалитирования может быть реализован при использовании в качестве лигатуры хромоалюминиевого сплава с массовым соотношением компонентов $Cr:Al = 1:1$.

Посредством компьютерного моделирования проанализировано влияние размеров и формы частиц оксида алюминия на значение термических напряжений и показано, что основной причиной напряжений является различие значений коэффициентов термического расширения покрытия со структурой $\beta-NiAl$ и частиц оксида Al_2O_3 . Установлено, что термические напряжения пропорциональны размерам включений Al_2O_3 и их значения возрастают при переходе от сферической формы частиц к цилиндрической. Для исключения образования оксида алюминия или уменьшения размеров оксидных частиц целесообразно наряду с уменьшением остаточного давления воздуха в установке использовать геттер кислорода в виде никель-иттриевой лигатуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Каблов Е.Н., Мубоядзьян С.А.* Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу “Авиационные материалы и технологии”)*. М.: Наука, 2012. С. 60–70.
2. *Арзамасов Б.Н.* Циркуляционный метод химико-термической обработки // *МиТОМ*. 2004. № 6. С. 3–6.
3. *Абраимов Н.В., Елисеев В.С.* Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. М.: Интернет Инжиниринг, 2001. 622 с.
4. *Шкретов Ю.П., Викулина Л.М., Терехин А.М.* Установка для получения жаростойких диффузионных покрытий газовым циркуляционным способом на наружных и внутренних поверхностях рабочих лопаток ГТД и ГТУ // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2009. № 10. С. 50–54.
5. *Арзамасов Б.Н., Симонов В.Н.* Циркуляционный способ нанесения покрытий // *МиТОМ*. 2010. № 9. С. 3–7.
6. *Хромоалитирование* циркуляционным способом охлаждаемых лопаток газовых турбин / В.Н. Симонов, Н.В. Абраимов, Ю.П. Шкретов, В.В. Лукина, А.М. Терехин // *МиТОМ*. 2007. № 7. С. 36–39.
7. *Симонов В.Н., Бахронов К.К., Терехин А.М.* Выбор рабочей газовой среды для нанесения защитных диффузионных покрытий // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2004. № 3. С. 57–60.
8. *Ватолин Н.А., Мусеев Г.К., Трусов Б.Г.* Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. М.: Металлургия, 1994. 352 с.
9. *Трусов Б.Г.* Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. вып. “Программная инженерия”*. 2012. С. 240–249.
10. *Коломыцев П.Т.* Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов. М.: Металлургия, 1991. 237 с.
11. *Красновский Е.Е.* Решение прикладных задач термомеханики с применением программного комплекса ANSYS. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 88 с.

REFERENCES

- [1] Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-resistant and thermal blankets for high-pressure turbine blades of long-range gas-turbine engines. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aircraft materials and technologies: Anniversary research and technology digest (supplement of Aircraft materials and technologies journal)]. Moscow, Nauka Publ., 2012, pp. 60–70 (in Russ.).
- [2] Arzamasov B.N. Circular method of thermochemical treatment. *MiTOM* [Metal Science and Heat Treatment], 2004, no. 6, pp. 3–6 (in Russ.).
- [3] Abraimov N.V., Eliseev V.S. Khimiko-termicheskaya obrabotka zharoprochnykh staley i splavov [Thermochemical treatment of heat-resistant steel and alloys]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2001. 622 p.
- [4] Shkretov Yu.P., Vikulina L.M., Terekhin A.M. Setup for creating heat-resistant diffusion coatings using the gaseous circular method on the external and internal surfaces of rotating blades of both gas-turbine engines and gas turbine installations. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening technologies and coatings], 2009, no. 10, pp. 50–54 (in Russ.).
- [5] Arzamasov B.N., Simonov V.N. Circular method of coating process. *MiTOM* [Metal Science and Heat Treatment], 2010, no. 9, pp. 3–7 (in Russ.).

- [6] Simonov V.N., Abraimov N.V., Shkretov Yu.P., Lukina V.V., Terekhin A.M. Chrome aluminizing of coolable gas-turbine engine blades using the circular method. *MITOM* [Metal Science and Heat Treatment], 2007, no. 7, pp. 36–39 (in Russ.).
- [7] Simonov V.N., Bakhrunov K.K., Terekhin A.M. Choosing an operating gaseous medium for applying protective diffusion coatings. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Mashinost.* [Proc. Univ., Mech. Eng.], 2004, no. 3, pp. 57–60 (in Russ.).
- [8] Vatolin N.A., Moiseev G.K., Trusov B.G. Termodinamicheskoe modelirovanie v vysokotemperaturnykh neorganicheskikh sistemakh [Thermodynamic simulation in hyperthermal inorganic systems]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1994. 352 p.
- [9] Trusov B.G. Code System for Simulation of Phase and Chemical Equilibriums at Higher Temperatures. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr., Spetsvyp "Programmnyaya inzheneriya"* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng., Spec. Iss. 2. Software engineering], 2012, pp. 240–249 (in Russ.).
- [10] Kolomytsev P.T. Vysokotemperaturnye zashchitnye pokrytiya dlya nikelovykh splavov [Hyperthermal protective coatings for nickel alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 237 p.
- [11] Krasnovskiy E.E. Reshenie prikladnykh zadach termomekhaniki s primeneniem programmnoy kompleksa ANSYS [Handling of applied problems of thermomechanics using the software package ANSYS]. Moscow, MGТУ im. N.E. Baumana Publ., 2008. 88 p.

Статья поступила в редакцию 23.01.2015

Симонов Виктор Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры “Материаловедение” МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Simonov V.N. — Dr. Sci., Professor of Material Science Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Унчикова Марина Васильевна — канд. техн. наук, доцент кафедры “Материаловедение” МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Unchikova M.V. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Material Science Department of Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Пахомова Светлана Альбертовна — канд. техн. наук, доцент кафедры “Материаловедение” МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Pakhomova S.A. — Cand. Sci., Assoc. Professor of Material Science Department of Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Симонов В.Н., Унчикова М.В., Пахомова С.А. Повышение качества хромоалитированных покрытий, полученных газоциркуляционным методом // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 2. С. 134–145. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-2-134-145

Please cite this article in English as:

Simonov V.N., Unchikova M.V., Pakhomova S.A. Quality improvement of chrome-aluminizing coatings, obtained with gas-circulating. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 2, pp. 134–145. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-2-134-145