

УДК 621.762

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-45-61>



Анализ и разработка методов устранения производственных дефектов теплозащитных покрытий, получаемых электронно-лучевым испарением в вакууме

З.Е. Игнатьев^{1✉}, А.А. Шатульский¹

¹ Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева
ул. Пушкина, д. 53, г. Рыбинск 152934, Российская Федерация

✉ e-mail: zaharignatev91@gmail.com

Резюме

Цель. Процесс формирования теплозащитного покрытия на поверхности лопаток турбин газотурбинных двигателей задействует комплекс сложного технологического оборудования. Целями настоящей работы являются: систематизация, выявление причин и возможные способы устранения производственных дефектов теплозащитных покрытий, получаемых электронно-лучевым испарением в вакууме.

Методы. Для достижения целей были проанализированы дефекты теплозащитных покрытий, сформированных на рабочих лопатках турбины из монокристаллического жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ. Металлический подслоя в системе теплозащитного покрытия был нанесен ионно-плазменным методом на установке МАП1-М. Формирование керамического теплоизоляционного слоя было выполнено электронно-лучевым испарением с конденсацией из паровой фазы на установке L-8. Для исследования дефектов керамического покрытия использовались средства оптической и электронной микроскопии, а также металлографии. Определение химического состава фазовых компонентов в поверхностном слое и теплозащитном покрытии лопаток производилось с помощью энергодисперсионного анализатора, входящего в состав электронного микроскопа.

Результаты. Выявлены причины возникновения дефектов покрытий на разных стадиях производства. Проведена классификация дефектов и меры по их устранению и предупреждению их возникновения.

Заключение. Проанализировав опыт серийной технологии, можно сделать вывод о том, что дефекты теплозащитных покрытий можно условно разделить на две группы: дефекты, образовавшиеся при нанесении покрытий, а также дефекты, образовавшиеся при вспомогательных операциях изготовления покрытий. Дефекты, выявленные визуальным контролем, поддаются устранению, несмотря на увеличение сроков выпуска продукции одновременно с её удорожанием. Однако наибольшую опасность представляют скрытые дефекты, выявление которых невозможно на этапе изготовления и контроля. Такие дефекты проявляются только при испытаниях или эксплуатации, ставя под угрозу работоспособность всего двигателя в целом.

Ключевые слова: теплозащитные покрытия; жаропрочные никелевые сплавы; производственные дефекты; микроструктура материала; лопатки турбины.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Игнатьев З.Е., Шатульский А.А. Анализ и разработка методов устранения производственных дефектов теплозащитных покрытий, получаемых электронно-лучевым испарением в вакууме // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 2. С. 45–61. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-45-61>.

Поступила в редакцию 02.05.2025

Подписана в печать 03.06.2025

Опубликована 30.06.2025

Analysis and development of methods for eliminating production defects of thermal barrier coatings formed by electron beam physical vapor deposition in the vacuum

Zakhar E. Ignatev¹✉, Alexander A. Shatul'sky¹

¹ P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University
53 Pushkin Str., Rybinsk 152934, Russian Federation

✉ e-mail: zaharignatev91@gmail.com

Abstract

The purposes. The process of forming a heat-protective coating on the surface of turbine blades of gas turbine engines involves a complex of complicated technological equipment. The purpose of this work is to systematize, identify the causes and possible ways to eliminate manufacturing defects of thermal barrier coatings produced by electron beam evaporation in vacuum.

Methods. To achieve this goal, of thermal barrier coating formed on the turbine blades from a single-crystal nickel superalloy ZHS32-VI were analyzed. The metal sublayer in the thermal barrier coating system was deposited by the ion-plasma method on the MAP1-M equipment. The ceramic thermal insulation layer was formed by electron beam evaporation with condensation from the vapor phase on the L-8 installation. Optical and electron microscopy and metallography were used to study defects in the ceramic coating. The chemical composition of the phase components in the surface layer and thermal barrier coatings of the blades was performed using an energy dispersive analyzer included in an electron microscope.

Results. The causes of coating defects at different stages of production have been identified. The classification of defects and measures for their elimination and prevention of their occurrence are carried out.

Conclusion. After analyzing the experience of serial technology, it can be concluded that defects of thermal barrier coatings can be divided into two groups: defects formed during deposition as well as defects formed during auxiliary coating manufacturing operations. Defects detected by visual inspection can be eliminated, despite the increase in the production time at the same time as its price increase. However, the greatest danger is hidden defects, which cannot be detected at the manufacturing and control stage. Such defects appear only during testing or operation, endangering the performance of the entire engine as a whole.

Keywords: heat-protective coatings; heat-resistant nickel alloys; manufacturing defects; microstructure of the material; turbine blades.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Ignatev Z. E., Shatul'sky A. A. Analysis and development of methods for eliminating production defects of thermal barrier coatings formed by electron beam physical vapor deposition in the vacuum. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2025;15(2):45–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-45-61>.

Received 02.05.2025

Accepted 03.06.2025

Published 30.06.2025

Введение

Повышение температуры газового потока и необходимость увеличения рабочего ресурса в современных газотурбинных двигателях (ГТД) обуславливают применение теплозащитных покрытий (ТЗП) для таких ответственных элементов, как лопатки турбины [1]. Применение

покрытий увеличивает окислительную стойкость защищаемого сплава, что положительно сказывается на долговечности деталей [2].

Особое внимание в области технологии защиты лопаток ГТД заслуживают ТЗП, получаемые электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме (EB-PVD) [3]. Многослойные системы

теплозащитных покрытий эффективно противостоят высокотемпературной коррозии и снижают температуру на поверхности деталей [4]. Столбчатая структура покрытий, сформированных электронно-лучевым испарением, обладает высокими характеристиками прочности [5].

Нанесение теплозащитных покрытий электронно-лучевым осаждением в вакууме на охлаждаемые лопатки турбины является сложным процессом, зависящим от целого ряда параметров. На качество покрытий влияют такие факторы, как: параметры работы пушек нагрева и подогрева в электронно-лучевой установке для нанесения покрытий [6]; термическая обработка [7]; исходная шероховатость поверхности [8]; микроструктура материала подложки и формируемого покрытия [9]; фазовый состав термически выращенного оксида на границе покрытия и защищаемого сплава [10]. Также к факторам, определяющим качество покрытий, следует отнести состояние поверхностного жаростойкого слоя в системе теплозащитного покрытия [11] и скорость вращения деталей при формировании покрытий [12]. Зачастую в погоне за производительностью в условиях серийного производства могут корректироваться некоторые технологические параметры, что в конечном счете

приводит к серьезным дефектам продукции.

Материалы и методы

Исследование производственных дефектов теплозащитных покрытий проводилось на рабочих лопатках турбины, изготовленных методом литья с направленной кристаллизацией из монокристаллического жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ, химический состав которого представлен в таблице 1.

Нанесение теплозащитных покрытий на рабочих лопатках турбины было выполнено в две стадии:

1) формирование металлического жаростойкого слоя ионно-плазменным методом на установке МАП-1М. Состав материала, используемого для жаростойкого покрытия, представлен в таблице 2;

2) осаждение керамического теплоизоляционного слоя электронно-лучевым испарением с конденсацией из паровой фазы на установке L-8. Химический состав материала керамического слоя указан в таблице 3.

Оценка состояния поверхности лопаток и теплозащитного покрытия на них производилась с помощью бинокулярного микроскопа с увеличением до 115 крат.

Таблица 1. Химический состав сплава ЖС32-ВИ

Table 1. Chemical composition of the alloy ZhS32-VI

Содержание элементов, % (по массе)														
Ni	Cr	Co	W	Al	Ti	Re	Ta	Nb	Hf	C	Mo	B	Ce	Zr
Основа	4,9	9,0	8,5	5,9	–	4,0	4,0	1,6	–	0,15	1,0	0,02	0,025	–

Таблица 2. Химический состав материала жаростойкого слоя

Table 2. Chemical composition of the heat-resistant layer material

Содержание элементов, % (по массе)				
Ni	Co	Cr	Al	Y
основа	18 – 22	18 – 22	11 – 13	0,2 – 0,6

Таблица 3. Химический состав теплоизоляционного слоя**Table 3.** Chemical composition of the thermal insulation layer

Соединение	Массовая доля, %
Диоксид циркония (ZrO_2)	основа
Оксид иттрия (Y_2O_3)	$7,0 \pm 1,0$
Оксид гафния (HfO_2)	$\leq 2,5$

Микроструктура поверхностного слоя и системы теплозащитного покрытия лопаток изучалась при помощи светового оптического микроскопа с увеличением до 1000 крат, а также растрового электронного микроскопа ф. FEI с вольфрамовым катодом и разрешающей способностью 8 нм в режиме работы обратноотраженных электронов (BSED). Определение химического состава фазовых компонентов в поверхностном слое и теплозащитном покрытии лопаток производилось с помощью энергодисперсионного анализатора, входящего в состав электронного микроскопа.

Результаты и их обсуждение

Анализ дефектов покрытий, которые приводили к отбраковке лопаток или к их разрушению на стадии испытаний эксплуатации либо выявить наиболее характерные и опасные дефекты керамических покрытий, к которым можно отнести: разнотолщинность, выплески покрытия на поверхности лопатки, сегментацию, изменение цвета покрытия после термической обработки, загрязнение поверхностного слоя материала лопаток перед нанесением покрытий.

Разнотолщинность

При нанесении покрытий на защищаемые детали немаловажную роль играет равномерность распределения толщины покрытия на поверхности детали. Неравномерное распределение толщины теплоизоляционного покрытия на рабочих лопатках турбины, работающих в достаточно жестких условиях (высокотемпера-

турное воздействие, эрозионное воздействие, центробежные нагрузки, а в случае морских ГТД – и воздействие коррозионной атмосферы) приводит к неравномерному распределению температурных полей на поверхности лопатки [13], что сказывается на возникновении термических напряжений в покрытии [14]. По этой причине существуют довольно жесткие ограничения по толщине покрытий при разработке конструкций лопаток. Среди всего производственного брака, связанного с нанесением керамических покрытий методом электронно-лучевого осаждения в вакууме, около 80% – неравномерность толщины и, как следствие, – несоответствие требований нормативной документации.

Равномерность толщины покрытия в установках обеспечивается за счет перемещения лопаток в оснастке внутри рабочей камеры. Так, в электронно-лучевой установке для нанесения покрытий УЭн-500 (ОАО «Электромеханика», г. Ржев) предусмотрена планетарная система вращения лопаток в оснастке. В установке для нанесения покрытий ALD (Германия) оснастка с лопатками представляет собой «рукав», на котором перпендикулярно его оси установлены лопатки с возможностью вращения вокруг собственной оси.

В электронно-лучевой установке [15], на которой были нанесены системы покрытий в данной работе, планетарной системы вращения лопаток не предусмотрено. Оснастка представляет собой металлический диск, на который с помощью контактной сварки фиксируют лопатки в

количестве 12 штук. Оснастка закрепляется на штоке, который в процессе нанесения покрытий вращается со скоростью 12 об/мин.

В таком режиме нанесения происходит упомянутый эффект «затенения», в результате которого возникает неоднородность толщины покрытия в пределах рассматриваемого участка лопатки. Проанализировав распределение толщины керамического покрытия на лопатках турбины разных конструкций, было установлено,

что при полной загрузке оснастки (12 лопаток за один технологический цикл нанесения) и ориентации лопаток спинкой к потоку испаряемого вещества наблюдалось различие по толщине керамического покрытия на спинке и корыте схемой «крест-накрест» (рис. 1). Толщины на противоположающихся поверхностях (например, спинка со стороны входной кромки и корыто со стороны выходной кромки) практически идентичны.

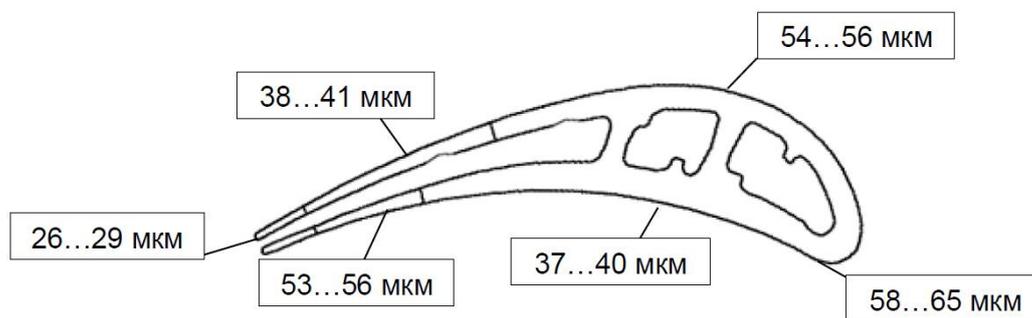


Рис. 1. Разнотолщинность керамического покрытия на лопатке

Fig. 1. The difference of thickness of the ceramic coating on the blade

Следствием этой проблемы являлся тот факт, что при разнотолщинности становится проблематично оценить ориентировочную среднюю толщину покрытия в процессе его нанесения, т. к. она определяется косвенным методом по показаниям весового датчика, представляющего собой специальное устройство, расположенное в вакуумной камере, на рабочей поверхности которого и осаждается слой испаряемого вещества. Значению весового датчика соответствует разность масс на лопатке до и после процесса нанесения покрытия. Поэтому проверить толщину покрытия для определенного значения весового датчика можно только металлографическим, т. е. разрушающим контролем. При равномерном распределении толщины покрытия на лопатке показания толщин на входной кромке, спинке и корыте будут отличаться незначительно. В условиях неравномерности значения толщин

отличаются не только между покрываемыми зонами (входная кромка, спинка, корыто), но и в рамках отдельных зон. В конструкторской документации обычно указывается требуемая толщина на трактовой поверхности лопатки. Так, при норме толщины покрытия по чертежу 56...84 мкм практически невозможно добиться толщины на спинке и корыте в пределах допуска. Наиболее нагруженным участком лопатки в тепловом отношении является входная кромка, соответственно, максимальная толщина покрытия обеспечивается именно на ней. При нижнем и среднем значении толщины покрытия по упомянутым ранее допускам на входной кромке будет наблюдаться недостаточная толщина покрытия на спинке и корыте.

В другом случае, если ориентироваться на требуемые значения толщин на спинке и корыте, существует высокий шанс превышения толщины покрытия на

входной кромке. При этом ремонт керамического покрытия, включающий в себя удаление покрытия пескоструйным методом, подготовку поверхности и повторное нанесение покрытия, по конструкторско-технологической документации допускается 3 раза, а для металлического – только 1 раз. При ремонте керамического покрытия, а конкретно при пескоструйной обработке поверхности, существует риск удаления и металлического покрытия вместе с керамическим, а это влечёт за собой риск несоответствия по толщине и металлического покрытия.

Выплески керамического покрытия на поверхности лопатки

Выплески – второй по распространенности дефект после разнотолщинности, количество выплесков регламентируется конструкторско-технологической документацией. Выплески представляют со-

бой скопления испаряемого вещества на поверхности лопатки, обычно размером 0,1...0,3 мм (рис. 2). Существуют две основные причины возникновения выплесков:

- нестабильность работы электронных пушек, отвечающих за нагрев керамических штабиков;
- наличие пустот в керамическом штабике. При нагреве электронным лучом испаряемого слитка образуется «зеркало расплава», т. е. участок расплавленного материала, с поверхности которого происходит испарение. При приближении зеркала расплава к пустоте (в пустотах присутствует воздух, который не удалить из штабика) внутри слитка происходит резкое изменение объема, сопровождающееся нарушением целостности зеркала расплава и всплеском расплавленного материала.



Рис. 2. Выплески материала покрытия на поверхности лопатки

Fig. 2. Splashes of coating material on the blade surface

Определяющую роль для качества покрытия играет момент времени образования выплесков. Если выплески сформировались в конце процесса напыления, то они не нарушают целостности микроструктуры керамического покрытия. По сути, их можно рассматривать как локальные утолщения покрытия. Однако если выплески были сформированы в начале

процесса нанесения, их микроструктура отличается от остального покрытия и адгезионная связь с подложкой практически отсутствует. Такого рода выплески легко удаляются щеткой с грубым ворсом, обнажая защищаемую поверхность лопатки (рис. 3).

Выплески имеют куполообразную форму, причем зона контакта выплеска и

подложки имеет минимальную площадь (рис. 4). В микроструктуре наблюдается образование кристаллов второго порядка, причем максимальный угол разориентировки между кристаллами первого и вто-

рого порядков достигает 90° . При таких особенностях морфологии выплеск будет иметь минимальную адгезионную прочность с подложкой, что подтверждается в условиях производства.

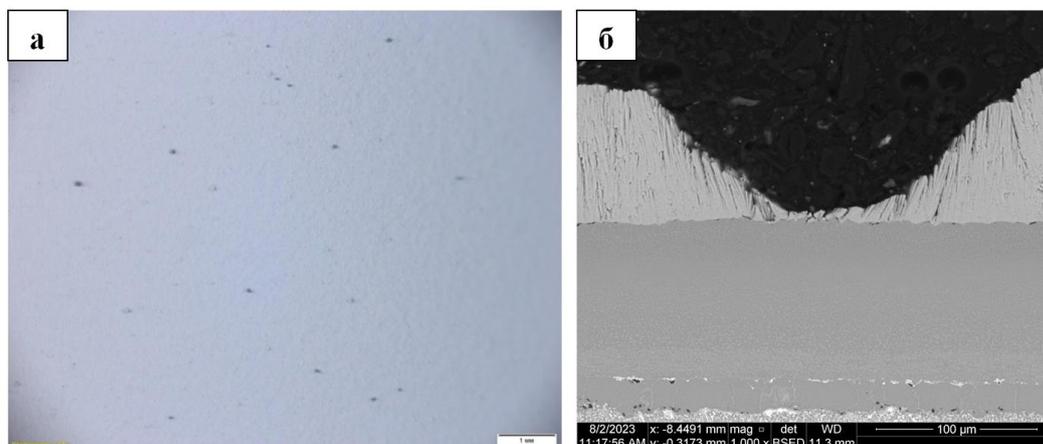


Рис. 3. Выкрашивания капель на поверхности лопатки: а – внешний вид поверхности ($\times 25$); б – микрошлиф по выкрашиванию, РЭМ ($\times 1000$)

Fig. 3. Spallation of splashes on the blade surface: а – appearance of the surface ($\times 25$); б – cross-section of the spallation, SEM ($\times 1000$)

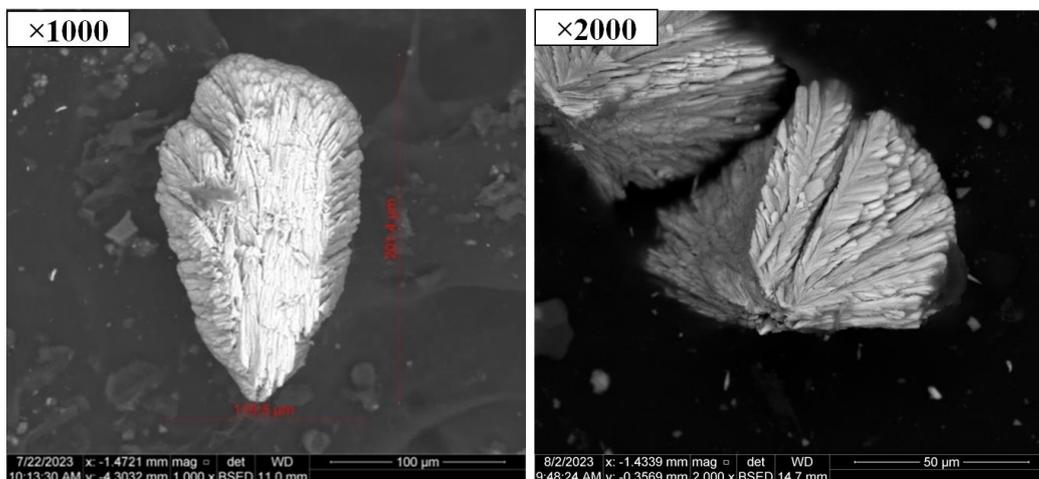


Рис. 4. Микроструктура материала выплеска (РЭМ)

Fig. 4. Microstructure of the splashed material (SEM)

Сегментация керамического покрытия

Сегментация представляет собой кластеры керамического покрытия с ярко выраженными границами. Согласно конструкторско-технологической документации сегментация на покрытии допустима только после проведения диффузионного отжига, обнаруживаемая при четырех-

кратном увеличении. Однако в условиях производства сегментация покрытия может появиться и после нанесения покрытия (рис. 5). Причем адгезионная прочность такого покрытия с подложкой в радиусе замковой или бандажной полок будет значительно меньше, чем на пере лопатки.

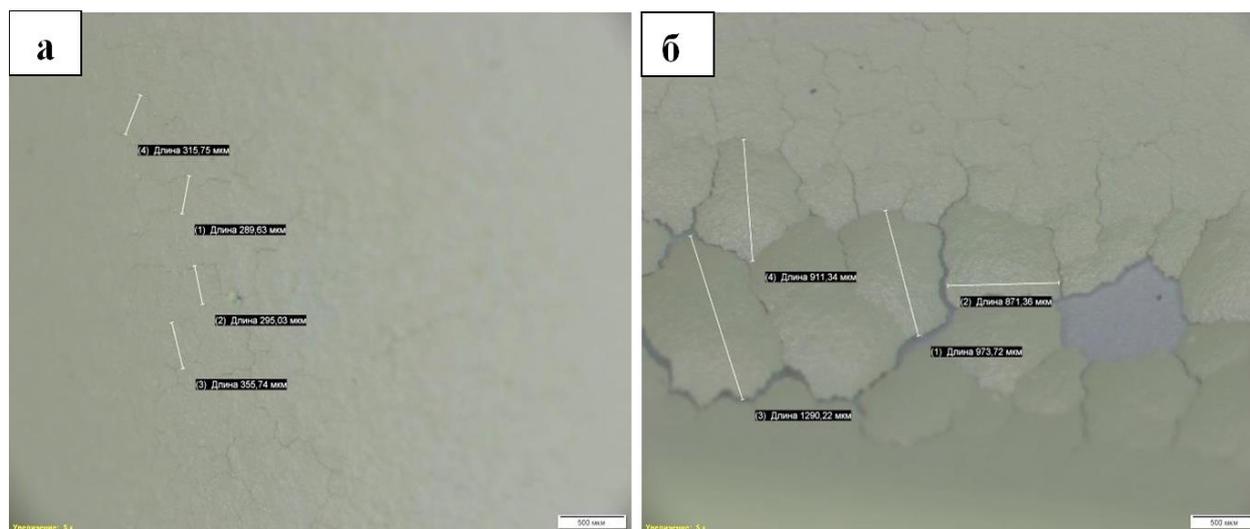


Рис. 5. Сегментация керамического покрытия: а – на пере лопатки; б – в радиусе перехода до проведения вакуумного отжига ($\times 50$)

Fig. 5. Segmentation of the ceramic coating: а – on the blade airfoil; б – on the transition radius before vacuum annealing ($\times 50$)

Основные причины появления сегментации следующие:

- высокая шероховатость поверхности подложки. Кристаллы покрытия формируются в направлении потока испаряемого вещества; при наличии микронеровностей поверхности угол между поверхностью подложки и формирующимся кристаллом будет отличаться от нормали, из-за чего будут образовываться кластеры с разной ориентацией кристаллов (рис. 6). Причем чем больше угол ориентации кристаллов отличается от нормали, тем ниже адгезионная прочность покрытия;

- нестабильность работы электронных пушек, отвечающих за подогрев лопатки во время процесса нанесения покрытий. При недостаточной температуре поверхности нарушается процесс формирования столбчатых кристаллов керамического покрытия. На микроуровне это может выражаться в разнотекстурности (чередование столбчатых и мелких равно-

осных кристаллов) и образовании границ раздела в пределах покрытия.

Изменение цвета покрытия после термической обработки

Термическая обработка лопаток с керамическим покрытием представляет собой операцию вакуумного диффузионного отжига, предназначенного для повышения адгезионной связи между керамическим покрытием и подложкой. Изменение цвета керамического покрытия возможно только при условии присутствия кислорода в камере печи, как в случае с окислительным отжигом. Данное явление признается условным браковочным признаком ввиду отсутствия требований в нормативной документации. Поэтому изменение цвета поверхности можно отнести к дефекту только при выявленном нарушении технологического процесса термической обработки, а именно при регистрации факта натекания кислорода в камеру вакуумной печи.

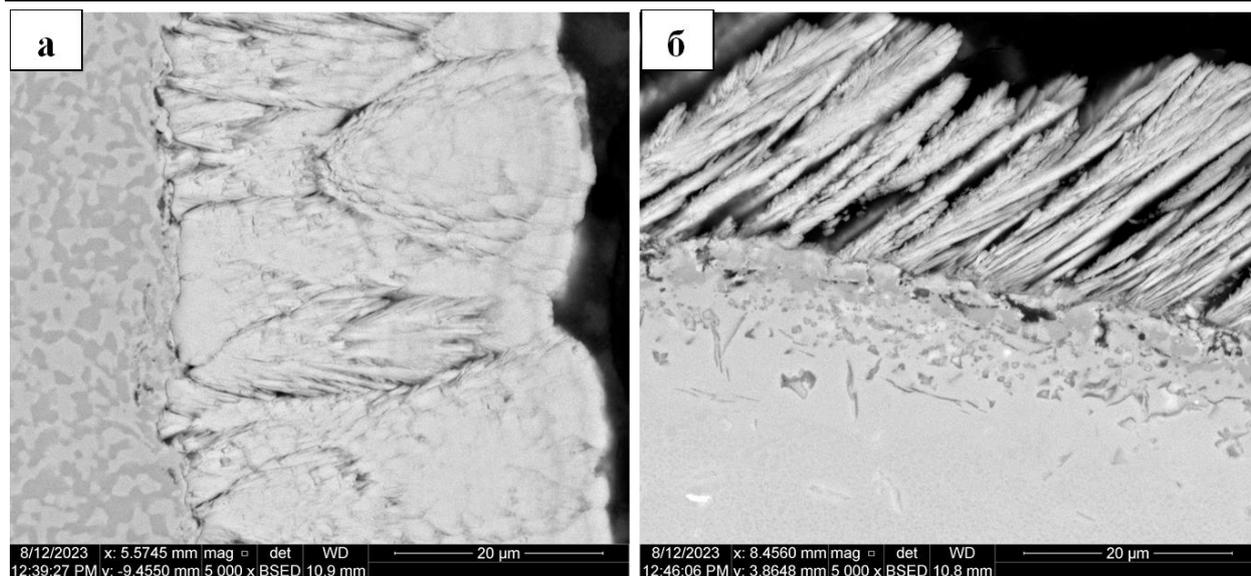


Рис. 6. Микроструктура керамического покрытия: а – на пере лопатки, б – в радиусе перехода пера в замковую полку, РЭМ (×5000)

Fig. 6. Microstructure of the ceramic coating: a – on the blade airfoil; б – on the transition radius, SEM (×5000)

Для выявления причин изменения цвета покрытия после вакуумной термической обработки на исследование было предоставлена лопатка с дефектом, описанном ранее – сегментацией на корыте (рис. 7, а, в). При анализе параметров процесса нанесения покрытия был установлен факт отключения электронной пушки, отвечающей за подогрев поверхности в процессе нанесения. Отключение длилось

порядка двух минут, после чего процесс был возобновлен. После нанесения покрытия была проведена операция вакуумного диффузионного отжига по утвержденному технологическому процессу. Нарушений в процессе термической обработки выявлено не было, однако поверхность лопаток приобрела зеленый оттенок (рис. 7, б, г).

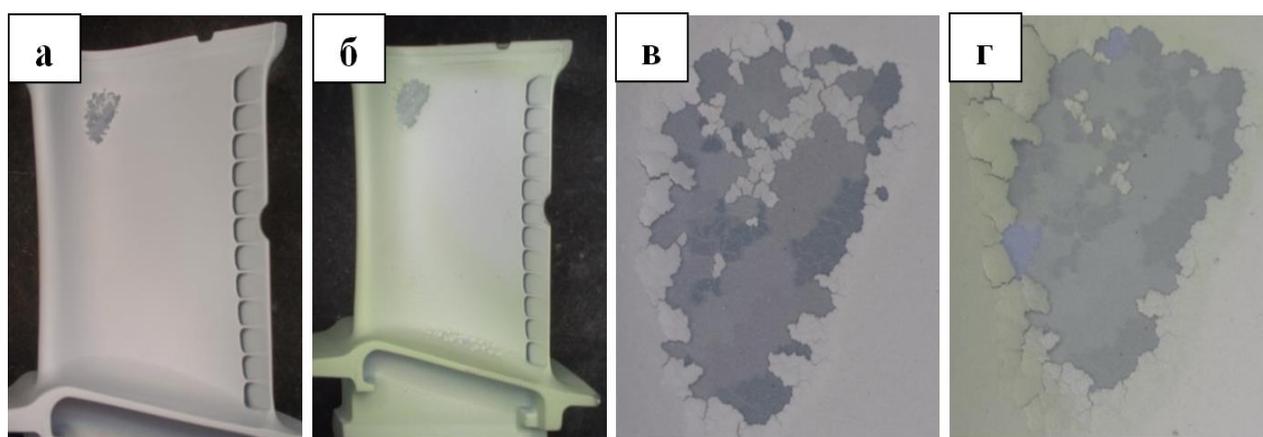


Рис. 7. Внешний вид лопатки: а, в – с сегментацией до проведения термической обработки, б, г – после проведения термической обработки

Fig. 7. Appearance of the blade: a, c – with segmentation before heat treatment; в, г – after heat treatment

Помимо этого на корыте было выявлено увеличение интенсивности сегментации керамического покрытия, причем наибольшая интенсивность сегментации наблюдалась в области радиуса перехода корыта в замковую полку. Как показал анализ, причиной появления этого дефекта могли быть особенности организации производства. Дело в том, что в условиях серийного производства вакуумная печь используется во множестве технологических процессов, где требуется проведение термической обработки, в частности, в данной печи проводилась термическая обработка не только лопаток с покрытием, но и жаростойких высокохромистых материалов. Ввиду того, что хром имеет свойство испаряться при высоких температурах (больше 1000°C), оседая на камере печи, было высказано предположение о том, что зеленый оттенок лопаток являлся следствием оседания хрома с последующим его окислением. Исходя из

этого предположения, на поверхности керамического покрытия должен был присутствовать слой толщиной до 1 мкм, состоящий из оксида хрома. Металлографическим анализом с использованием растровой электронной микроскопии было установлено (рис. 8):

- присутствие оксида хрома на поверхности керамики;
- частичное окисление жаростойкого покрытия под керамическим слоем;
- наличие слоя термически выращенного оксида между керамическим и жаростойким слоями.

Указанные факты свидетельствуют о том, что изменение цвета поверхности керамического покрытия на лопатках связано с натеканием кислорода в камеру вакуумной печи в процессе отжига, несмотря на то, что сбоя в работе печи не было и значение вакуума по данным приборов было в норме.

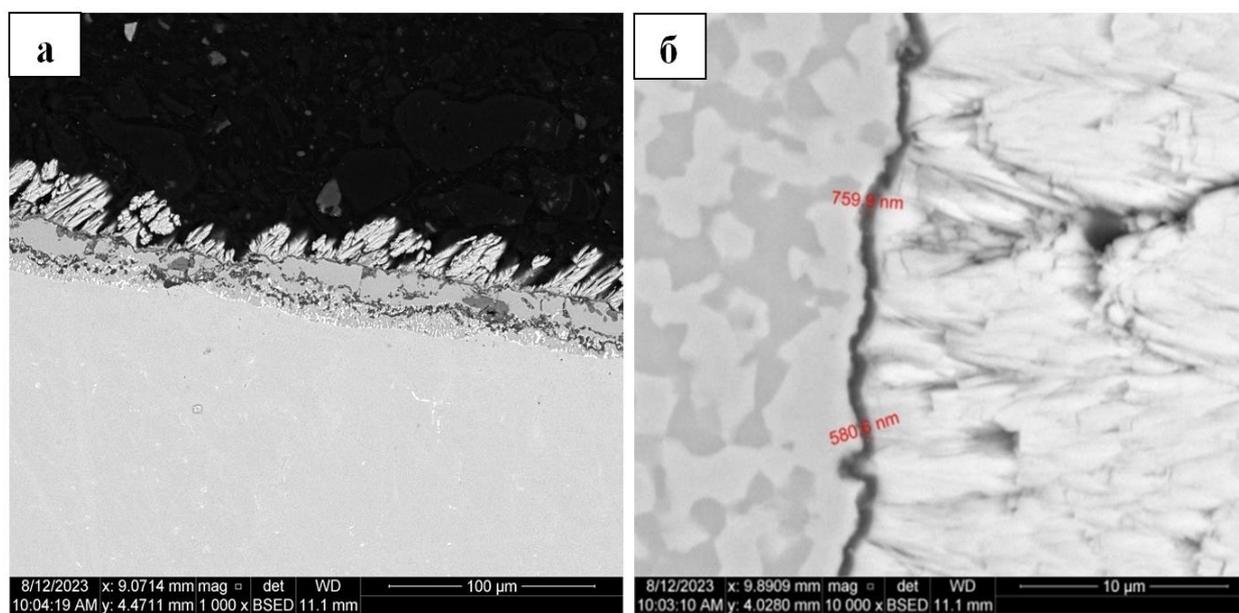


Рис. 8. Признаки окисления покрытия после вакуумного диффузионного отжига в сечении микрошлифа: а – окисление жаростойкого покрытия в районе замковой полки лопатки; б – термически выращенный оксид между слоями покрытия, РЭМ ($\times 1000$)

Fig. 8. Signs of oxidation of the coating after vacuum diffusion annealing (cross-section): а – oxidation of the heat-resistant coating in the area of the platform of the blade; б – thermally grown oxide between the coating layers, SEM ($\times 1000$)

Термическая обработка также может выявить дефекты, связанные с нестабильностью нанесения керамического покрытия. Керамический слой на пера лопатки после некорректной работы электронных пушек подогрева состоит из двух слоев (рис. 9), причем сегментация с последующим отслоением внешнего слоя керамического покрытия наблюдалась только на

корыте. Возможной причиной этого явления, помимо охлаждения поверхности, могла послужить криволинейная вогнутая поверхность пера лопатки, о чем свидетельствует образование горизонтальных трещин (помимо границы раздела между слоями керамического слоя из-за прерывания процесса испарения), не характерных для данного типа покрытия.

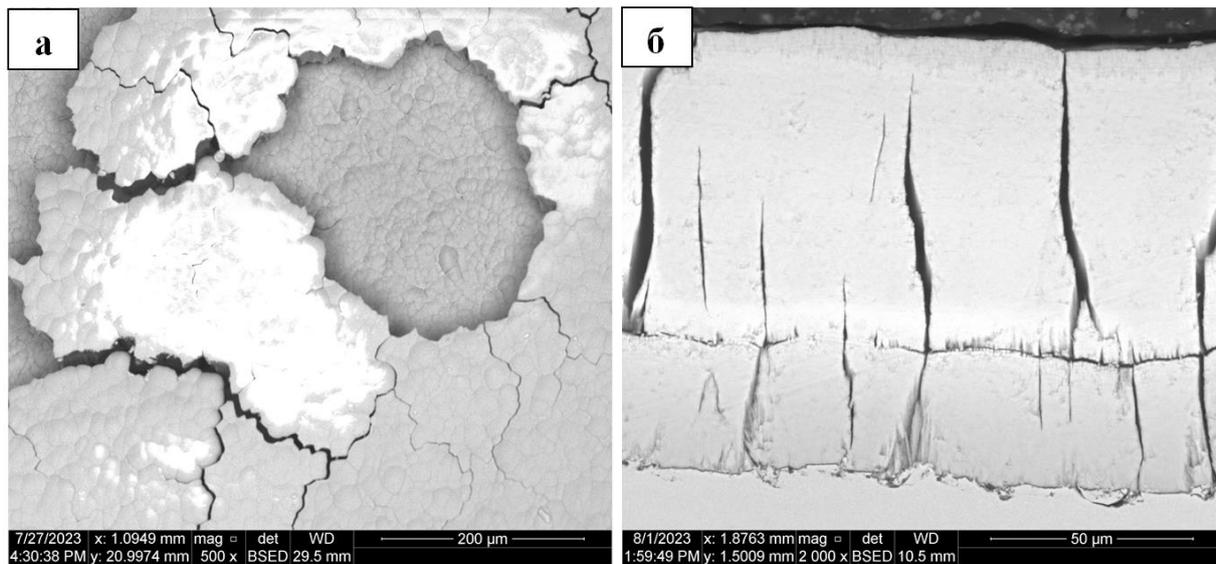


Рис. 9. Сегментация керамического покрытия после термической обработки: а – поверхность ($\times 500$); б – микрошлиф ($\times 2000$)

Fig. 9. Segmentation of the ceramic coating after heat treatment: а – surface ($\times 500$); б – cross-section ($\times 2000$)

Известно, что микроструктура керамического покрытия на корыте более плотная с большим значением микротвердости, чем на спинке [16]. Экспериментальные данные, описывающие характер влияния термического воздействия на развитие напряженного состояния [17], коррелируют с результатами, полученными с помощью расчетных моделей [18].

Загрязнение поверхностного слоя материала лопаток перед нанесением покрытий

Загрязнения поверхности материала лопатки представляют собой включения инородных материалов, которые невозможно удалить в рамках подготовки поверхности перед нанесением покрытий.

Включения представляют собой частицы корунда, внедряющегося в поверхность материала лопатки при пескоструйной обработке поверхности (рис. 10). Примечателен тот факт, что внедрение корунда происходит при подготовке поверхности перед нанесением металлического покрытия, хотя перед нанесением керамики лопатки проходят одинаковые комплексы подготовительных операций. Процесс подготовки поверхности включает в себя пескоструйную очистку электрокорундом, промывку дистиллированной водой в УЗК-ванне и сушку при температуре $120...150^{\circ}\text{C}$.

Помимо внедрения фрагментов электрокорунда в поверхностный слой мате-

риала, после пескоструйной обработки существует вероятность возникновения рекристаллизации поверхности материала лопатки [19]. Явление поверхностной рекристаллизации в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах связано с растворением упрочняющей γ' -фазы при воздействии температур, превышающих температуру сольвуса [20]. При эксплуатации лопаток турбин, изготовленных из

данных материалов, опасность поверхностной рекристаллизации заключается в выкрашивании рекристаллизованных зёрен из-за особенностей систем легирования жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом направленной кристаллизации [21]. Применение систем теплозащитных покрытий на лопатках турбин снижает, но не устраняет явление поверхностной рекристаллизации [22].

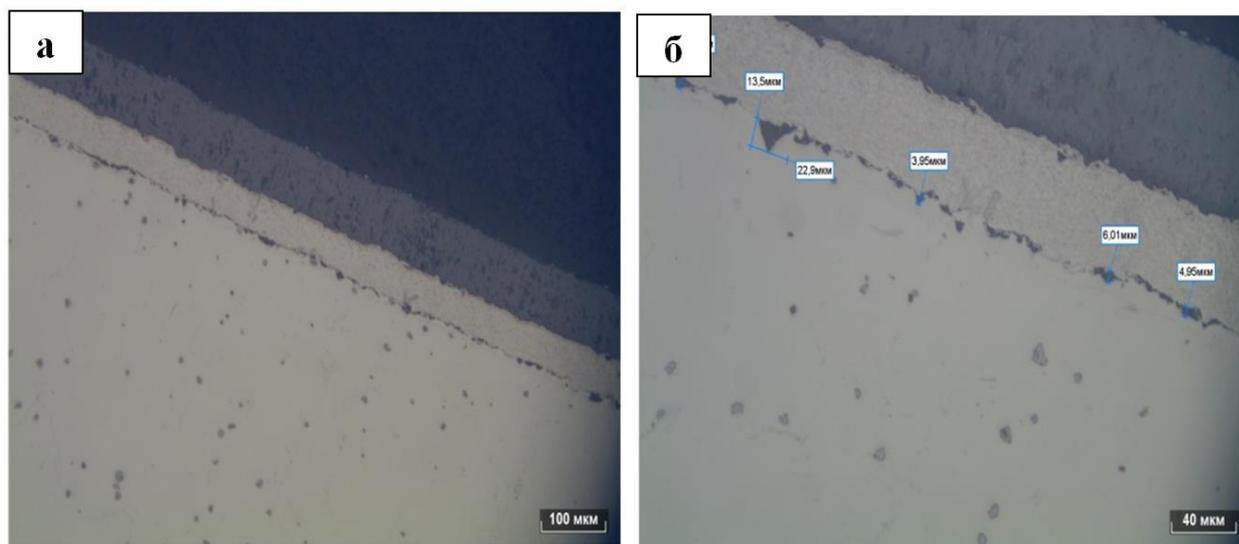


Рис. 10. Включения электрокорунда в поверхностном слое лопатки: а – $\times 200$; б – $\times 500$

Fig. 10. Fused alumina inclusions in the blade surface layer: а – $\times 200$; б – $\times 500$

Для оценки влияния пескоструйной обработки была исследована лопатка с дефектом керамического покрытия в виде отслоения покрытия (рис. 11). Отслоение системы теплозащитного покрытия произошло после проведения вакуумной термической обработки. Процесс нанесения покрытия двухстадийный, включающий в себя ионно-плазменное формирование жаростойкого слоя и электронно-лучевое нанесение керамического слоя. Перед нанесением жаростойкого слоя лопатка прошла операцию пескоструйной обработки поверхности. Осмотром отслоившегося фрагмента покрытия установлено, что внутренняя поверхность частицы темно-серого цвета, что свидетельствует об окислении металла под керамическим покрытием.

Осмотром шлифа по удаленному участку отслоения покрытия (рис. 12) было установлено, что на поверхности лопатки обнаружены включения на основе оксида алюминия размером до 40 мкм. Отслоение покрытия произошло по диффузионной зоне между металлическим слоем и материалом лопатки. Наличие загрязнений на границе раздела допускается нормативно-технической документацией в ограниченном объеме при условии изолированности таких включений. В случае с исследованной лопаткой включения имели остроугольную форму и располагались строчечно, что привело к накоплению напряжений при проведении термической обработки с последующим отслоением теплозащитного покрытия.

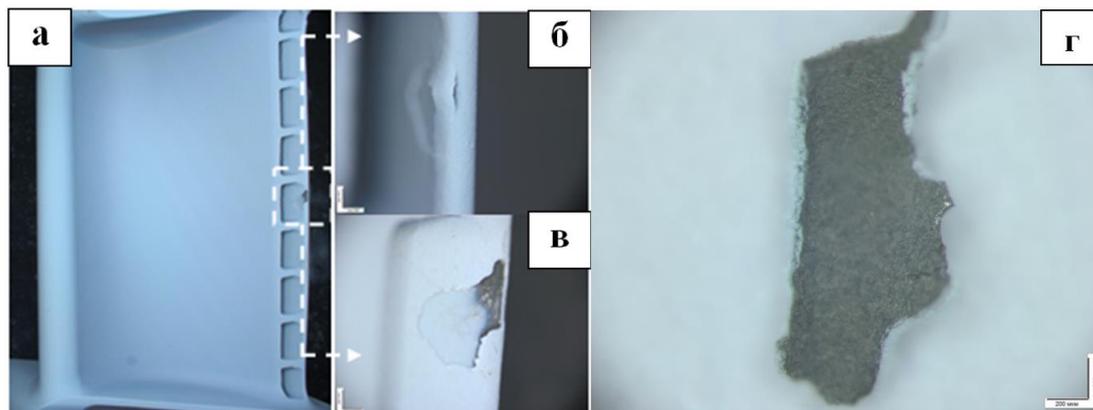


Рис. 11. Внешний вид лопатки: а – со стороны корыта; б – со стороны участка отслоения покрытия; в – участок под отслоением; г – отслоившийся участок покрытия (вид со стороны металлического слоя)

Fig. 11. Appearance of the blade: а – from the pressure side; б – from the side of the spallation coating; в – the area under spallation, г – spalled coating area (view from the side of the metal layer)

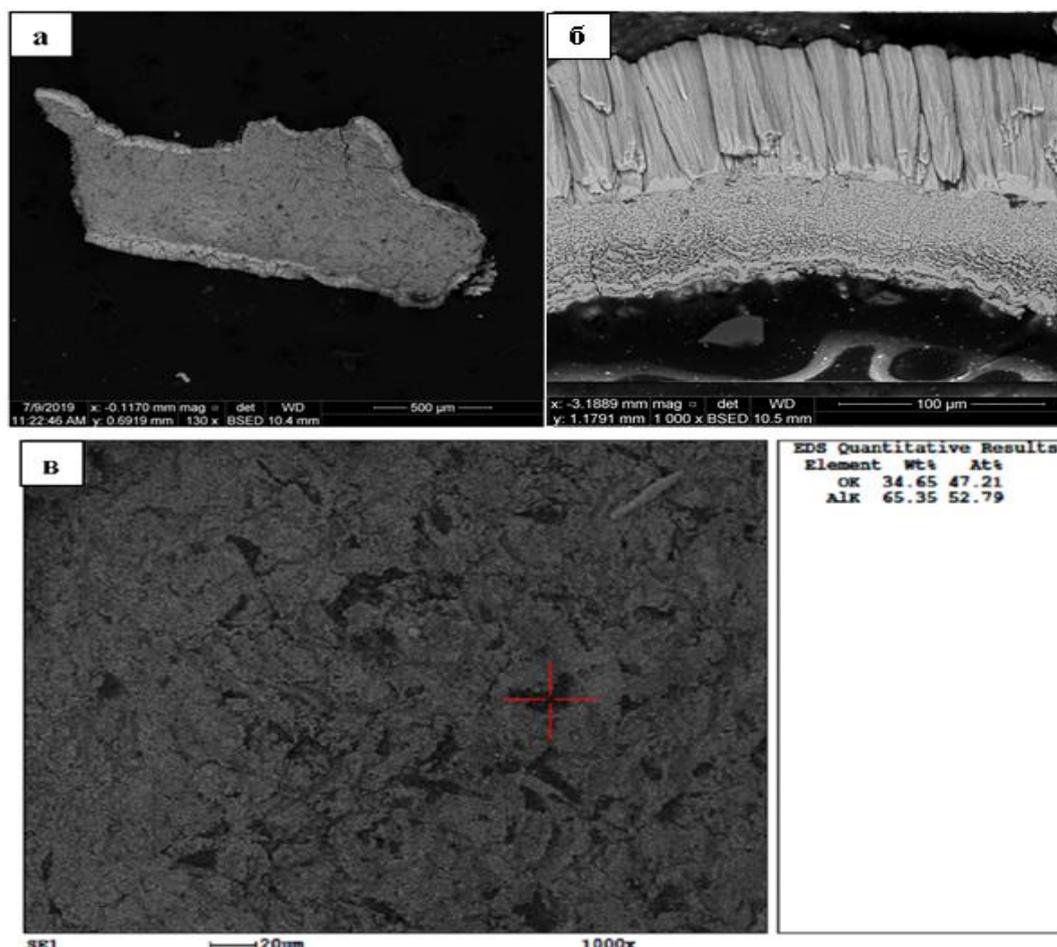


Рис. 12. Внешний вид удаленного участка отслоения покрытия: а – общий вид ($\times 130$); б – микрошлиф участка отслоения покрытия ($\times 1000$); в – химический состав включений на поверхности лопатки под удаленным участком отслоения покрытия ($\times 1000$)

Fig. 12. Appearance removed area of spalled coating: а – general view; б – cross-section of removed area of spalled coating; в – chemical composition of inclusions on the blade surface under removed area of spalled coating ($\times 1000$)

Выводы

Проанализировав опыт серийной технологии, можно сделать вывод о том, что дефекты теплозащитных покрытий можно условно разделить на две группы:

- дефекты, образовавшиеся при нанесении покрытий;
- дефекты, образовавшиеся при вспомогательных операциях изготовления покрытий.

Дефекты, выявленные визуальным контролем, поддаются устранению, несмотря на увеличение сроков выпуска продукции одновременно с её удорожанием. Однако наибольшую опасность представляют скрытые дефекты, выявление которых невозможно на этапе изготовления и контроля. Такие дефекты проявляются только при испытаниях или эксплуатации, ставя под угрозу работоспособность всего двигателя в целом.

Список литературы

1. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: Авиадвигатель, 2006. Ч. 1. 602 с.
2. Елисеев Ю.С., Абраимов Н.В., Крымов В.В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении. М.: Высш. шк., 1999. 525 л.: ил.
3. Bi X.F., Xu H.B., Gong S.K. Investigation of the failure mechanism of thermal barrier coatings prepared by electron beam physical vapor deposition // *Surface and Coatings Technology*. 2000. Vol. 130. P. 122–127. [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(00\)00693-9](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(00)00693-9).
4. Wang Y., Sayre G. Commercial thermal barrier coatings with a double-layer bond coat on turbine vanes and the process repeatability // *Surface and Coatings Technology*. 2009. Vol. 203. P. 2186–2192. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.02.007>.
5. Schulz U., Schmucker M. Microstructure of ZrO₂ thermal barrier coatings applied by EB-PVD // *Material Science & Engineering: A*. 2000. Vol. 276. P. 1–8. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(99\)00576-6](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(99)00576-6).
6. Способ контроля толщины покрытий: патент 2753846 Российская Федерация / Игнатьев З.Е. № 2020137938; заявл. 18.11.2020; опубл. 24.08.2021, Бюл. № 24. 7 с.
7. Effect of vacuum annealing on initial oxidation behavior and alumina transition of NiCoCrAlY coatings / A. Ullah, A. Khan, Z.B. Bao, C.T. Yu, S.L. Zhu, F.H. Wang // *Surface & Coatings Technology*. 2020. Vol. 404. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126441>.
8. Ostadi A., Hosseini S. H., Fordoei M. E. The effect of temperature and roughness of the substrate surface on the microstructure and adhesion strength of EB-PVD ZrO₂-8wt%Y₂O₃ coating // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46, is. 2. P. 2287–2293. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.217>.
9. Wu L.T., Wu R.T., Zhao X., Xiao P. Microstructure parameters affecting interfacial adhesion of thermal barrier coatings by the EB-PVD method // *Material Science & Engineering: A*. 2013. Vol. 594. P. 193–202. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.11.054>.
10. Liu J., Byeon J.W., Sohn Y.H. Effects of phase constituents/microstructure of thermally grown oxide on the failure of EB-PVD thermal barrier coating with NiCoCrAlY bond coat // *Surface & Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. P. 5636–5644. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.140>.
11. Effect of bond coating surface roughness on high-temperature performance of EB-PVD thermal barrier coatings / H. Xiaopeng, L. Qing, X. Zhihang, L. Sai, W. Qian, G. Jinwei, Zh. Wang // *Ceramics International*. 2025. Vol. 51, is. 11. P. 14307-14318. <https://doi.org/10.3390/coatings12050596>.

12. Kadam N. R., Karthikeyan G., Kulkarni Dh. M. Effect of substrate rotation on the microstructure of 8YSZ thermal barrier coatings by EB-PVD // *Materials Today: Proceeding*. 2020. Vol. 28, pt. 2. P. 678-683. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.276>.

13. Rätzer-Scheibe H.-J., Schulz U., Krell T. The effect of coating thickness on the thermal conductivity of EB-PVD PYSZ thermal barrier coatings // *Surface & Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. P. 5636-5644. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.07.109>.

14. Ионно-плазменные жаростойкие покрытия с композиционным барьерным слоем для защиты от окисления сплава ЖС36ВИ / С.А. Будиновский, С.А. Мубояджян, А.М. Гаямов, С.В. Степанова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. № 1. С. 34-40.

15. Промышленная электронно-лучевая установка L-8 для осаждения теплозащитных покрытий на лопатки турбин / Н.И. Гречанюк, П.П. Кучеренко, А.Г. Мельник, Д.В. Ковальчук, И.Н. Гречанюк // *Автоматическая сварка*. 2014. № 10. С. 48-53.

16. Влияние кривизны поверхности подложки на структуру и свойства термобарьерных, конденсационных покрытий / К.Ю. Яковчук, Ю.Э. Рудой, Л.М. Нероденко, Е.В. Оноприенко, А.О. Ахтырский // *Электронно-лучевые процессы*. 2011. № 1. С. 22-29.

17. Residual stresses in environmental and thermal barrier coatings on curved superalloy substrates: Experimental measurements and modeling / D. Liu, S.T. Kyaw, P.E.J. Flewitt, M. Seraffon, N.J. Simms, M. Pavier [et al.] // *Material Science & Engineering: A*. 2014. Vol. 606. P. 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.014>.

18. Comparison of thermal stresses developed in Al₂O₃-SG, ZrO₂-(12% Si+Al) and ZrO₂-SG thermal barrier coating systems with NiAl, NiCrAlY and NiCoCrAlY interlayer materials subjected to thermal loading / I. Taymaz, A. Mimaroglu, E. Avci, V. Uçar, M. Gur // *Surface & Coatings Technology*. 1999. Vol. 116-119. P. 690-693. [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(99\)00121-8](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(99)00121-8).

19. Шатульский А.А., Игнатьев З.Е. О механизме протекания процесса рекристаллизации в поверхностном слое отливки после пескоструйной обработки // *Вестник РГАТА имени П.А. Соловьева*. 2016. № 1 (36). С. 72-75.

20. Jichun X., Jiarong L., Shizhong L. Surface recrystallization in Nickel base single crystal superalloy DD6 // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2010. Vol. 23. P. 478-485. [https://doi.org/10.1016/s1000-9361\(09\)60244-2](https://doi.org/10.1016/s1000-9361(09)60244-2).

21. Нейман А.В., Филонова Е.В., Исходжанова И.В. О локальной рекристаллизации в монокристаллах никелевых жаропрочных сплавов // *Металлургия машиностроения*. 2013. № 1. С. 19-22.

22. Surface recrystallization of single crystal nickel-based superalloy / B. Zhang, X. Cao, D. Liu, X. Liu // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013. Vol. 23, is. 5. P. 1286-1292. [https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(10\)60031-3](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(10)60031-3).

Reference

1. Inozemcev A.A., Sandrackij V.L. Gas turbine engines. Perm: Aviadvigatel'; 2006. 602 p. (In Russ.)

2. Eliseev Yu. S., Abraimov N.V., Krymov V.V. Processing and coatings in aircraft engines industry. Moscow: Vysshaya shkola; 1999. 525 p. (In Russ.)

3. Bi X.F., Xu H.B., Gong S.K. Investigation of the failure mechanism of thermal barrier coatings prepared by electron beam physical vapor deposition. *Surface and Coatings Technology*. 2000;130:122-127. [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(00\)00693-9](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(00)00693-9).

4. Wang Y., Sayre G. Commercial thermal barrier coatings with a double-layer bond coat on turbine vanes and the process repeatability. *Surface and Coatings Technology*. 2009;203:2186-2192. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.02.007>.

5. Schulz U., Schmucker M. Microstructure of ZrO₂ thermal barrier coatings applied by EB-PVD. *Material Science & Engineering: A*. 2000;276:1-8. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(99\)00576-6](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(99)00576-6).
6. Ignatev Z.E. Method for determining coating thickness. Russian Federation patent 2753846. 24 August 2021. (In Russ.)
7. Ullah A., Khan A., Bao Z.B., Yu C.T., Zhu S.L., Wang F.H. Effect of vacuum annealing on initial oxidation behavior and alumina transition of NiCoCrAlY coatings. *Surface & Coatings Technology*. 2020;404:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126441>.
8. Ostadi A., Hosseini S. H., Fordoei M. E. The effect of temperature and roughness of the substrate surface on the microstructure and adhesion strength of EB-PVD ZrO₂-8wt%Y₂O₃ coating. *Ceramics International*. 2020;46(2):2287-2293. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.217>.
9. Wu L.T., Wu R.T., Zhao X., Xiao P. Microstructure parameters affecting interfacial adhesion of thermal barrier coatings by the EB-PVD method. *Material Science & Engineering: A*. 2013;594:193–202. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.11.054>.
10. Liu J., Byeon J.W., Sohn Y.H. Effects of phase constituents/microstructure of thermally grown oxide on the failure of EB-PVD thermal barrier coating with NiCoCrAlY bond coat. *Surface & Coatings Technology*. 2006;200:5636-5644. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.140>.
11. Xiaopeng H., Qing L., Zhihang X., Sai L., Qian W., Jinwei G., et al. Effect of bond coating surface roughness on high-temperature performance of EB-PVD thermal barrier coatings. *Ceramics International*. 2025;51(11):14307-14318. <https://doi.org/10.3390/coatings12050596>.
12. Kadam N.R., Karthikeyan G., Kulkarni Dh.M. Effect of substrate rotation on the microstructure of 8YSZ thermal barrier coatings by EB-PVD. *Materials Today: Proceeding*. 2020;28(2):678-683. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.276>.
13. Rätzer-Scheibe H.-J., Schulz U., Krell T. The effect of coating thickness on the thermal conductivity of EB-PVD 8YSZ thermal barrier coatings. *Surface & Coatings Technology*. 2006;200:5636-5644. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.07.109>.
14. Budinovskij S.A., Muboyadzhyan S.A., Gayamov A.M., Stepanova S.V. Ion-plasma heat-resistant coatings with composite barrier layer for protecting alloy ZhS36VI FROM oxidation. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal science and heat treatment of metals*. 2011;(1):34-40. (In Russ.)
15. Grechanyuk N.I., Kucherenko P.P., Melnik A.G., Kovalchuk D.V., Grechanyuk I.N. Industrial electron beam installation L-8 for deposition of heat-protective coatings on turbine blades. *Avtomaticheskaya svarka = The Paton Welding J*. 2014;(10):48-53. (In Russ.)
16. Yakovchuk K.Yu., Rudoj Yu.E., Nerodenko L.M., Onoprienko E.V., Ahtyrskij A.O. Effect of substrate surface curvature on structure and properties of thermal barrier condensation coatings. *Sovremennaya electrometallurgiya = Electrometallurgy today*. 2011;(1):22-29. (In Russ.)
17. Liu D., Kyaw S.T., Flewitt P.E.J., Seraffon M., Simms N.J., Pavier M., et al. Residual stresses in environmental and thermal barrier coatings on curved superalloy substrates: Experimental measurements and modeling. *Material Science & Engineering: A*. 2014;606:117-126. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.014>.
18. Taymaz I., Mimaroglu A., Avcı E., Uçar V., Gur M. Comparison of thermal stresses developed in Al₂O₃-SG, ZrO₂-(12% Si+Al) and ZrO₂-SG thermal barrier coating systems with NiAl, NiCrAlY and NiCoCrAlY interlayer materials subjected to thermal loading. *Surface & Coatings Technology*. 1999;116-119:690-693. [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(99\)00121-8](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(99)00121-8).
19. Shatul'sky A.A., Ignatev Z.E. Mechanism of grain recovery process in cast surface layer after sandblasting processing revisited. *Vestnik RGATA imeni P. A. Solov'eva = Vestnik of P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical Academy*. 2016;(1):72-75. (In Russ.)

20. Jichun X., Jiarong L., Shizhong L. Surface recrystallization in Nickel base single crystal superalloy DD6. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2010;23:478-485. [https://doi.org/10.1016/s1000-9361\(09\)60244-2](https://doi.org/10.1016/s1000-9361(09)60244-2).

21. Neiman A.V., Filonova E.V., Iskhodzhanova I.V. On local recrystallization in single crystals of high-temperature nickel alloys. *Metallurgiya i mashinostroyeniye = Metallurgy of Machinery Construction*. 2013;(1):19-22. (In Russ.)

22. Zhang B., Cao X., Liu D., Liu X. Surface recrystallization of single crystal nickel-based superalloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013;23(5):1286-1292. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(13\)62595-9](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(13)62595-9).

Информация об авторе / Information about the Author

Игнатъев Захар Евгеньевич, аспирант,
Рыбинский государственный авиационный
университет имени П.А. Соловьева,
г. Рыбинск, Российская Федерация,
e-mail: zaharignatev91@gmail.com

Zakhar E. Ignatev, Post-Graduate Student,
P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical
University, Rybinsk, Russian Federation,
e-mail: zaharignatev91@gmail.com

Шатульский Александр Анатольевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой МЛС, Рыбинский
государственный авиационный университет
имени П.А. Соловьева, г. Рыбинск,
Российская Федерация,
e-mail: shatulsky@rsatu.ru

Alexander A. Shatulsky, Doctor of Sciences
(Engineering), Professor, Head of Department
MCW, P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation
Technical University, Rybinsk,
Russian Federation,
e-mail: shatulsky@rsatu.ru