

УДК 669.017:629.7.023.22

Е. Г. СОТНИКОВ¹, З. В. ЛЕХОВИЦЕР¹, В. Л. ГРЕШТА²,
А. В. КЛИМОВ², Д. В. ТКАЧ²

¹АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина

²Запорожский национальный технический университет, Украина

РАЗРАБОТКА СОСТАВА ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ДЕТАЛИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

В работе представлены результаты по разработке состава уплотняющего теплозащитного покрытия, применяемого в горячем тракте газотурбинных двигателей, который позволит использовать детали при более высоких температурах и сформировать минимальный зазор между лопаткой и неподвижной частью турбины, что увеличит КПД двигателя, обеспечив тем самым экономию топлива. В исследовании проведен выбор легатуры положительно влияющей на жаропрочность, жаростойкость и эрозионную стойкость материала. С этой целью вносили иттрий содержащую легатуру трех видов. Установлено, что легатура №2 позволяет сохранить максимальное количество иттрия в составе покрытия.

Ключевые слова: теплозащитное покрытие, уплотняющее покрытие, жаропрочность, жаростойкость, эрозионная стойкость, шихта, иттрий, КНА, турбина.

Введение

Стремление к повышению КПД газотурбинных двигателей (ГТД) требует повышения температуры газа перед турбиной. При этом в процессе эксплуатации возможно появление таких проблем как чрезмерный износ торцов рабочих лопаток компрессора из-за малых радиальных зазоров между корпусом и лопатками; снижение срока службы деталей горячей части ГТД вследствие их недостаточной жаропрочности и жаростойкости [1]. При значительном повышении температуры газов применение существующих жаропрочных сплавов в совокупности с охлаждением и нанесением жаростойких покрытий оказывается неэффективным и, следовательно, возникает необходимость применения специальных теплозащитных покрытий (ТЗП). При этом зачастую к таким покрытиям предъявляют несколько противоречивые требования. Например, для деталей турбины необходимо создать такие ТЗП, которые обеспечили бы значительное снижение температуры на поверхности основного материала, стойкость к высокотемпературной коррозии, а также эрозии. А в случае применения такого рода покрытий в уплотнительных кольцах появляется дополнительное требование – материал должен иметь удовлетворительную срабатываемость, чтобы избежать износа торцов рабочих лопаток и получить минимальные зазоры.

На сегодняшний день разработано большое ко-

личество вариантов защитных покрытий [2-5] для деталей горячего тракта ГТД, которые успешно работают при температурах до 1000 °С. Дальнейшее повышение температуры газов приводит к значительному снижению работоспособности в условиях скоростных газовых потоков. Следовательно, возникает необходимость совершенствования существующих покрытий либо разработки принципиально новых, которые позволят обеспечить высокую надежность работы деталей турбины при температурах порядка 1200 °С и выше.

На рост КПД газотурбинного двигателя помимо повышения температуры газов перед турбиной влияет снижение внутренних потерь [6]. Одним из путей их снижения является уменьшение величины зазоров в проточной части турбины, что достигается применением уплотнительных покрытий достаточно сложного состава. Особенностью этих покрытий является необходимость соблюдения таких противоречивых требований как эрозионная стойкость и прирабатываемость материала в процессе движения торца лопатки по покрытию (образование дорожек и обеспечение минимального зазора между лопаткой и неподвижной частью турбины). При этом необходимо обеспечить высокую жаропрочность и жаростойкость покрытий для предоставления возможности их работы в условиях высоких температур.

Оптимизации уплотнительных теплозащитных покрытий для горячего тракта ГТД уделяют недостаточное внимания [7-11], что, вероятно, связано с

тем, что разработка теплозащитных покрытий на лопатки ГТД является более приоритетным направлением, которое позволяет обеспечить гарантированный срок службы деталей горячего тракта турбины.

Для формирования требуемых свойств в уплотнительных покрытиях применяются элементы, обеспечивающие как жаростойкость и жаропрочность покрытия (Ni, Al, Cr и т.д.), так и его прирабатываемость (твердые смазки типа графита и нитрида бора) и эрозионную стойкость.

Применяемые на АО «Мотор Сич» уплотнительные покрытия формируются на основе модифицированной никель-кремниевой губки (КНА-82) и твердой смазки (графит + BN), что не позволяет гарантировать их теплостойкость в области температур порядка 1150 °С. Следовательно, является актуальной разработка теплозащитного прирабатываемого уплотняющего покрытия, которое можно будет применять в условиях высоких температур. При этом создание такого покрытия будет проходить в несколько этапов. На каждом из которых будет оптимизирован один из ключевых параметров.

Таким образом, целью работы является разработка состава уплотняющего теплозащитного прирабатываемого покрытия применяемого в горячем тракте газотурбинных двигателей, которое позволит не только применять детали ГТД при более высоких температурах, но и обеспечить минимальный зазор между лопаткой и неподвижной частью, что увеличит КПД двигателя, обеспечив тем самым экономию топлива. Данное исследование посвящено выбору лигатуры, позволяющей повысить жаропрочность, жаростойкость и эрозионную стойкость материала.

1. Материалы и методы исследования

В качестве основы покрытия были выбраны материалы, применяемые в серийном производстве, т.к. для напыления уплотнительных покрытий на предприятии применяется состав типа КНА-82, который достаточно хорошо зарекомендовал себя в авиационных двигателях с более низкой температурой газа в турбине. Покрытие наносилось газопламенным методом на жаростойкий подслои, который представлял собой никелевый сплав, содержащий жаростойкий компоненты (Al, Cr). Данный подслой обеспечивает как сопротивление высокотемпературной коррозии, так и высокую адгезионную прочность с материалом основы.

Как уже было указано выше, разработка покрытия проходит в несколько этапов. Первый заключается в повышении жаропрочности, жаростой-

кости и эрозионной стойкости покрытия. Для этого в шихту, приготавливаемую по серийной технологии вносили лигатуру, содержащую иттрий, т.к. известно, что его малые добавки положительно влияют на жаропрочность никелевых сплавов [12, 13], а железистые сплавы характеризуются значительным повышением износостойкости [14].

Также известно, что в процессе термических операций возможно значительное испарение данного элемента, что в дальнейшем необходимо будет учитывать при приготовлении шихты и газопламенном нанесении покрытия.

В связи с этим, в работе в шихту иттрия вносили тремя возможными вариантами лигатур (табл. 1), что позволило установить, в каком случае внесенный элемент сохранится максимально.

Таблица 1
Состав опытной лигатуры

№ состава	1	2	3
Элементы	Ni-Y	Y	Co-Ni-Al-Y

Для определения химического состава шихты и покрытия применяли микрорентгеноспектральный анализ. Микроструктуру покрытия изучали с помощью микроскопа Zeiss Axio Observer. Плотность измерялась методом гидростатического взвешивания.

2. Результаты исследований

В ходе исследований было установлено (табл. 2), что в процессе отжига шихты происходит значительное снижение содержания иттрия (масс. %). При этом при газопламенном нанесении покрытия содержание иттрия уменьшается не более чем на 10 %.

Таблица 2
Содержание иттрия

Содержание иттрия	Номер состава покрытия		
	1	2	3
в шихте после отжига	0,098	1,149	-
в нанесенном покрытии	0,087	1,097	-

В процессе исследования микроструктуры установлено, что теплозащитное покрытие нанесено на подслои без дефектов, на поверхности отсутствуют трещины, сколы (рис. 1). Размер структурных элементов и их распределение по площади шлифа во всех случаях практически одинаковы.

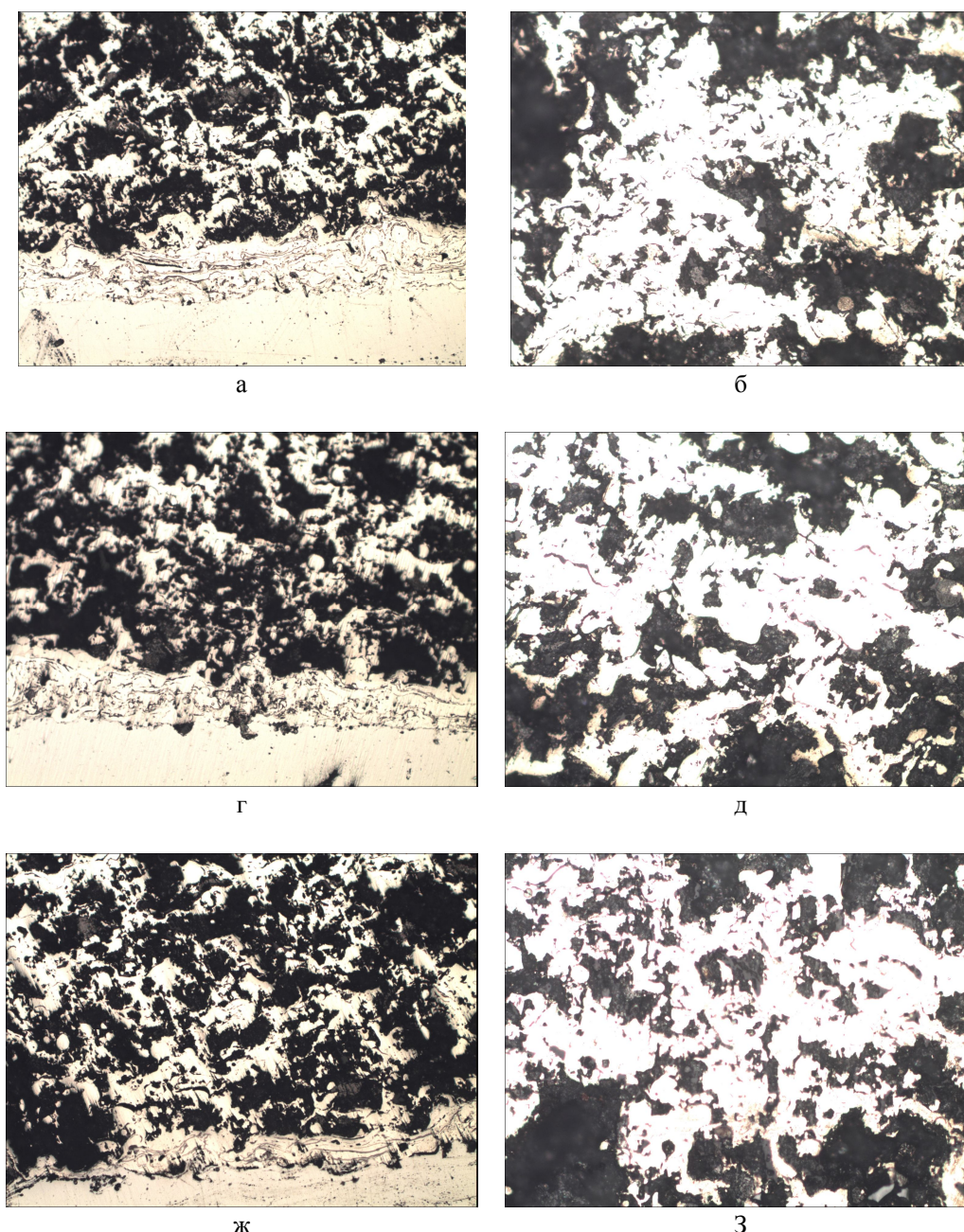


Рис. 1. Микроструктура покрытий после нанесения на основу:
а, б – состав №1; в, г – состав №2; д, е – состав №3 (увеличение, соответственно, $\times 100$, $\times 200$)

Измерение плотности покрытия подтвердило, что в случае всех вариантов лигатур плотность в среднем составляет $3,4 \text{ г/см}^3$. Твердость нанесенных покрытий составила в среднем 17 НВ, что должно обеспечивать удовлетворительную прирабатываемость покрытия.

Для экспрессной оценки влияния высоких температур на качество покрытия образцы выдерживали при температуре 1150°C в течение двух часов. На рис. 2 видно, что после выдержки в объеме покрытия не наблюдаются оксиды, отсутствуют трещины и сколы. Размеры структурных элементов

различаются, причем, как видно из рис. 2, наиболее равномерно структурные элементы распределены в случае состава №1. Микроструктура состава №2 характеризуется наибольшими размерами структурных элементов. Исходя из наблюдаемой микроструктуры можно предположить, что в процессе высокотемпературной выдержки прошли фазовые изменения во всех вариантах составов, причем эти изменения различаются между собой, т.к. процентное содержание иттрия в покрытии значительно отличалось.

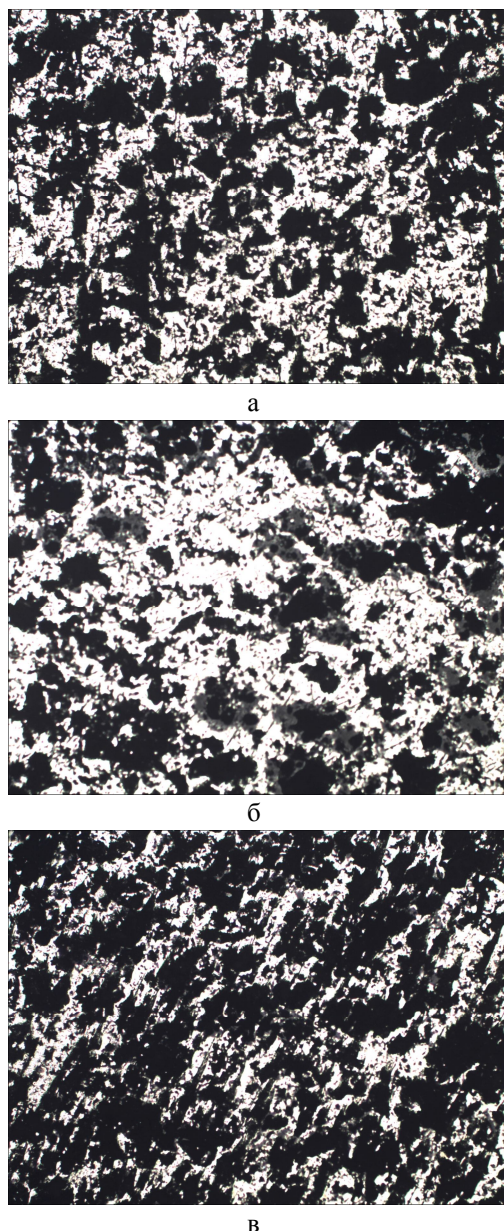


Рис. 2. Микроструктура покрытий после выдержки 2 часа при температуре 1150 °С (x50): а – состав №1; б - состав №2; в - состав №3

Заключение

Таким образом, в данной работе было установлено, что в процессе приготовления шихты и последующего нанесения покрытия на материал основы газопламенным способом, наибольшее количество иттрия остается при использовании лигатуры состава №2. Для установления влияния лигатуры на фазовый состав покрытия в различных состояниях необходимо в дальнейшем провести рентгеноструктурный анализ.

Литература

1. Мехерван, Д. Эксплуатационная готовность и надежность современных промышленных газотурбинных двигателей [Текст] / Д. Мехерван, П. Бойс // Газотурбинные технологии. – 2005. – № 2. – С. 2-9.
2. Влияние защитных покрытий на механические свойства жаропрочного сплава ЖС32-ВИ [Текст] / К. Ю. Яковчук, Ю. Э. Рудой, Е. В. Оноприенко [и др.] // Проблемы прочности. – 2010. – № 3. – С. 151-163.
3. Современные теплозащитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей и оборудование для их получения [Текст] / Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко, И. Н. Гречанюк [и др.] // Наук. нотатки : міжвуз. зб. – 2011. – Вип. 31. – С. 92-99.
4. Мубояджян, С. А. Комплексные защитные покрытия турбинных авиационных ГТД [Текст] / С. А. Мубояджян, В. П. Лесников, В. П. Кузнецов. – Екатеринбург : Изд-во Квист, 2008. – 208 с.
5. Lee, Woo Y. Stinton Concept of Functionally Graded Materials for Advanced Thermal Barrier Coating Applications [Electronic resource] / Woo Y. Lee, David P. Stinton and others // Journal of the American Ceramic Society. – 1996. – Vol. 79, № 12. – P. 3003-3012. – Access mode: <https://www.swinburne.edu.au/science-engineering-technology/staff-profiles/3120317/publications/1996%20LEE%20Concept%20of%20C&R.pdf>. – 12.02.2015.
6. Мухин, В. С. Модифицирование поверхностей деталей ГТД по условиям эксплуатации [Текст] / В. С. Мухин, А. М. Смыслов, С. М. Боровский. – М. : Машиностроение, 1995. – 256 с.
7. Газотермические уплотняющие (прирабатываемые) покрытия [Текст] / В. А. Фролов, Б.В. Рябенко, А.В. Курдюков [и др.] // Сварочное производство. – 2008. – № 10. – С. 42-44.
8. Уплотнительные материалы для проточного тракта ГТД [Текст] / В. П. Мизунов, Д. П. Фарафонов, М. Л. Деговец [и др.] // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 94-97.
9. Получение прирабатываемого жаростойкого покрытия на проставках ТК методом HVOF [Текст] / А. А. Кравец, Е. И. Гордиенко, О. А. Корогод [и др.] // Вестник двигателестроения. – 2014. – № 2. – С. 197-200.
10. Новиков, А. В. Жаростойкое прирабатываемое покрытие для надпортовых вставок стационарных газовых турбин [Текст] / А. В. Новиков, А. Г. Кочарян, А. А. Быбин // Газовая промышленность. – 2015. – №4 (721). – С. 43-46.
11. Срабатываемые, износостойкие и теплозащитные покрытия для деталей газового тракта турбины, компрессора и камеры сгорания ГТД [Текст] / В. А. Барвинок, И. Л. Шитарев, В. И. Богданович [и др.] // Вестник Самарского гос. аэрокосм. ун-та. – 2009. – № 3(19). – С. 11-28.

12. Сидоров, В. В. О механизме влияния микродобавок на сопротивление окислению жаропрочных никелевых сплавов [Текст] / В. В. Сидоров // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1995. – № 1. – С. 19-28.

13. Влияние микролегирования сплава ЖС6У иттрием на его фазовую стабильность [Текст] / В. В. Сидоров, Г. И. Морозова, А. М. Кулебякина

[и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1988. – № 12. – С. 23-27.

14. Парфенов, Л. Н. Влияние добавок редкоземельных элементов на износостойкость кованной стали 110Г13Л [Текст] / Л. Н. Парфенов, В. М. Глазков // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1972. – № 3. – С. 14-16.

Поступила в редакцию 17.06.2015, рассмотрена на редколлегии 23.06.2015.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедры МиТЛП В. В. Лунев, Запорожский национальный технический университет, Украина.

РОЗРОБКА СКЛАДУ ТЕПЛОЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ НА ДЕТАЛІ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Є. Г. Сотников, З. В. Леховицер, В. Л. Грешта, О. В. Климов, Д. В. Ткач

У роботі представлено результати по розробці складу ущільнюючого теплозахисного покриття застосованого в гарячому тракті газотурбінних двигунів, який дозволить використовувати деталі при більш високих температурах і забезпечити мінімальний зазор між лопаткою і нерухомою частиною турбіни, що збільшить ККД двигуна, забезпечивши тим самим економію палива. У дослідженні проведено вибір лігатури, яка буде сприяти підвищенню жароміцності, жаростійкості і ерозійній стійкості матеріалу. З цією метою вносили лігатуру, що містила ітрію трьох видів. Встановлено, що лігатура №2 дозволяє зберегти максимальну кількість ітрію в складі покриття.

Ключові слова: теплозахисне покриття, ущільнююче покриття, жароміцність, жаростійкість, ерозійна стійкість, шихта, ітрію, КНА, турбіна.

DEVELOPMENT OF A THERMAL BARRIER COATING FOR DETAILS TURBINE ENGINE, WORKERS AT HIGH TEMPERATURES

E. G. Sotnikov, Z. V. Lihovitser, V. L. Greshta, A. V. Klimov, D. V. Tkach

The results of the development of the composition of the heat seal coating used in hot sections of gas turbine engines, which will use parts at higher temperatures and form a minimum clearance between the blade and the fixed part of the turbine that will increase the efficiency of the engine, thus providing fuel savings. In a study conducted selection ligatures positively affecting improve heat resistance, heat resistance and resistance to erosion of the material. To this end, a ligature was added yttrium containing three kinds. Established that allow ligation №2 save a maximum amount of yttrium in the coating composition.

Keywords: thermal barrier coating, sealing coat, heat resistance, heat resistance, stand-bone erosion, charge, yttrium, KNA, turbine.

Сотников Евгений Георгиевич – начальник цеха №3, АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

Леховицер Зоя Васильевна – канд. техн. наук, доц., начальник бюро отдела главного металлурга, АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

Грешта Виктор Леонидович - канд. техн. наук, доц., проф. каф. физического материаловедения, Запорожский национальный технический университет, Украина.

Климов Александр Владимирович - канд. техн. наук, доц., декан инженерно-физического факультета, Запорожский национальный технический университет, Украина.

Ткач Дарья Владимировна - канд. техн. наук, доц. каф. физического материаловедения, Запорожский национальный технический университет, Украина.