

УДК 669.15-194

Д.А. Князев, О.В. Силина

D.A. Knyazev, O.V. Silina

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

**АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ ЗАЩИТНЫХ
ДИФфуЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, ВЫЯВЛЕННЫХ
ПОСЛЕ РАБОТЫ ЛОПАТОК В СОСТАВЕ
ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

**ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL DEFECTS OF PROTECTIVE
DIFFUSION COATINGS IDENTIFIED AFTER THE BLADES
IN THE GAS TURBINE ENGINE**

Проведен анализ различных дефектов лопаток газотурбинного двигателя, подвергаемых алитированию. Установлены причины образования дефектов. Даны рекомендации по устранению рассмотренных дефектов.

Ключевые слова: алитирование, диффузионный слой, структура, диффузионный отжиг, газотурбинный двигатель.

The analysis of different defects of gas-turbine engine blades subjected to aluminum layer, the causes of defects, recommendations on elimination of the considered defects.

Keywords: aluminum layer, diffusion layer, structure, diffusion annealing, gas turbine engine.

Проводился анализ дефектов лопаток, проработавших в газотурбинном двигателе (ГТД). Лопатки изготовлены из сплава ЖС6К-ВИ с нанесением диффузионного (алитированного) слоя.

Лопатки ГТД работают в условиях высоких температур (1000 °С), сульфидно-оксидной коррозии и при высоких нагрузках в контакте с авиационным керосином, содержащим серу. В результате работы данные лопатки также подвергаются влиянию эрозионного износа и механическим повреждениям.

В процессе эксплуатации возникают следующие дефекты [1]:

1. Снижение толщины алитированного слоя, частичное отсутствие слоя.
2. Дефекты внутри самого изделия.
3. Поры и инородные включения диффузионного слоя.
4. Местное оплавление слоя.

5. Деформация входной кромки лопатки.
6. Трещины на поверхности лопатки.
7. Механические повреждения пера и замка лопатки.
8. Оплавления на торце и кромке лопаток ГТД.
9. Повреждение внутренней полости лопатки ГТД.
10. Измененная геометрия лопатки.
11. Коррозионные дефекты.

Процесс производства лопатки ГТД из сплава ЖС6К-ВИ состоит из операций, представленных в виде блок-схемы на рис. 1.

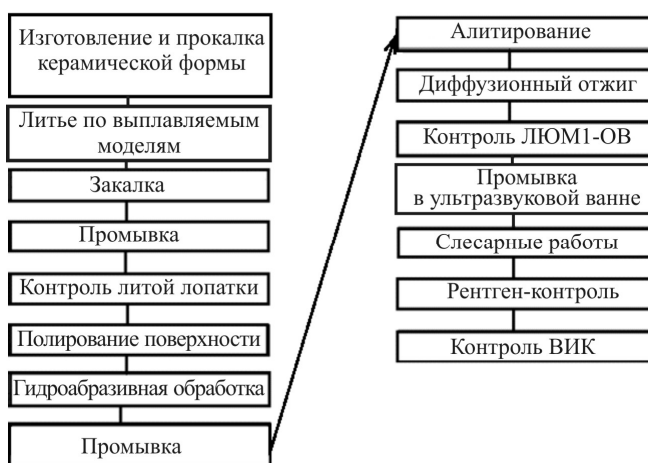


Рис. 1. Блок-схема изготовления лопаток ГТД из сплава ЖС6К-ВИ

Лопатки, прошедшие эксплуатацию в составе ГТД, приобретают различного рода дефекты. Можно выделить две причины образования дефектов:

1. Дефекты, пропущенные в производстве и получившие развитие в процессе длительного нагрева в окислительной среде газового потока.
2. Отдельные точечные дефекты, образовавшиеся в результате попадания на поверхность пера неметаллических частиц при подготовке поверхности и при нанесении защитных диффузионных покрытий.

Методами люминисцентного, визуально-измерительного, металлографического контроля и микрорентгеноспектрального анализа лопаток после эксплуатации в ГТД выявлены следующие дефекты:

1. Участок с несформировавшимся диффузионным покрытием.

Результаты исследований данного дефекта диффузионного покрытия показывают, что в его основании находится частица оксида алюминия (корунда), которая препятствовала развитию диффузионных процессов на проточной поверхности пера лопатки в процессе диффузионного отжига. Присутствие частиц корунда на поверхности пера обусловлено их внедре-

нием в жаропрочный сплав при гидроабразивной обработке, являющейся неотъемлемой операцией подготовки поверхности для нанесения покрытия (рис. 2).

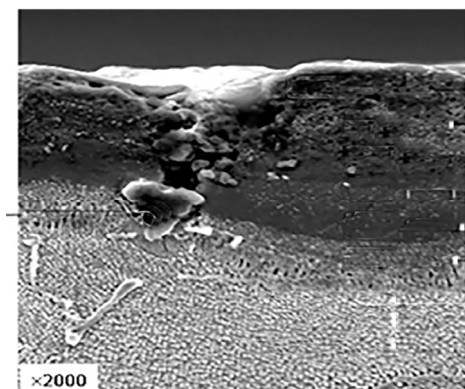


Рис. 2. Дефект в защитном алюминидном шликерном покрытии рабочей лопатки ГТД из сплава ЖС6К-ВИ [2]

2. Формирование недопустимых цепочек окислов в диффузионном слое.

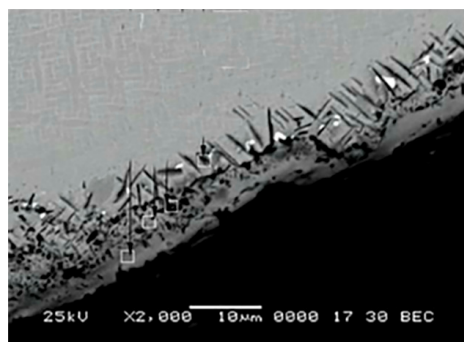


Рис. 3. Дефект в защитном ГЦА-покрытии рабочей лопатки ГТД из сплава ЖС6К-ВИ [2]

Установлено, что в процессе осаждения газоциркуляционного алитированного покрытия (ГЦА) произошло насыщение внутренней поверхности охлаждаемых каналов железом до 14 мас. % и окисление жаропрочного сплава, сопровождавшееся формированием оксида алюминия Al_2O_3 пластинчатой формы (рис. 3).

Вероятными причинами образования дефектного покрытия являются окислительная атмосфера в установке для осаждения газоциркуляционного алитированного покрытия и использование нержавеющей стали (источник железа) в качестве материала оснастки [2].

3. Термоусталостная трещина.

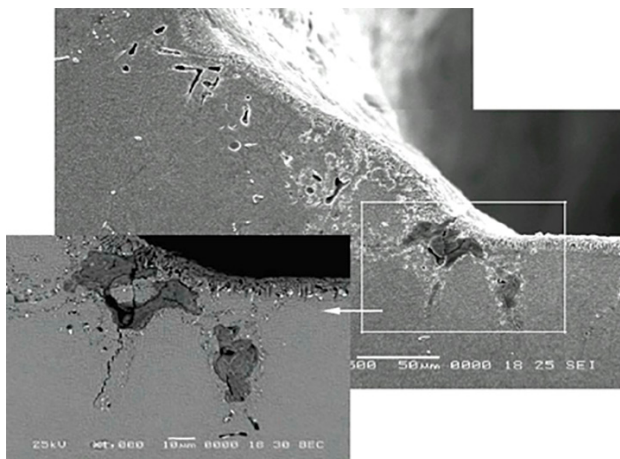


Рис. 4. Зарождение термоусталостных трещин на внутренней поверхности охлаждаемого канала лопатки ГТД из сплава ЖС6К-ВИ [2]

Повышение эксплуатационных характеристик рабочих лопаток ГТД охлаждаемой конструкции в настоящее время обеспечивается нанесением защитных диффузионных покрытий, состоящих из покрытия, полученного методом газоциркуляционного алитирования, применяемого для защиты внутренних поверхностей охлаждаемых каналов.

Характерной особенностью участков с термоусталостными трещинами является несформировавшееся ГЦА-покрытие на внутренней поверхности каналов, а также поверхностная микропористость жаропрочного сплава, образовавшаяся в результате выщелачивания карбидов на операции гидротермического автоклавного удаления керамических стержней из отливок лопаток [3, 4] (рис. 4).

4. Бугорки на диффузионном слое.

Локальные коррозионные повреждения в виде мелких, а затем все увеличивающихся бугорков появляются на поверхности пера лопаток после 300–1000 ч работы при температуре 750–800 °С. В начальной стадии развития очаг локальной коррозии представляет собой кольцевой нарост с углублением в центре или (чаще) маленький бугорок с конусообразной вершиной (рис. 5). При дальнейшем развитии образуется бугорок в виде полусферы. Диаметр бугорков находится в пределах от нескольких десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров. При скалывании бугорков на поверхности лопатки обнаруживается язва (рис. 5). Глубина язвы после 1500 ч работы лопаток при сжигании в ГТД газотурбинного топлива достигает 0,5 мм.



Рис. 5. Очаги локальной коррозии: бугорки и язвы под ними [1]

Образование бугорков и язв происходит в результате локального повреждения (пробоя) первоначально возникшей на поверхности металла оксидной пленки. Пробой пленки на лопатках ГТД происходит из-за резких и частых колебаний температуры, а на входной кромке лопатки он может вызываться ударным воздействием твердых частиц, содержащихся в газовом потоке. В месте повреждения оксидной пленки облегчается доступ сульфата натрия и других агрессивных компонентов среды к поверхности металла, поэтому интенсивная сульфидно-оксидная коррозия начинается здесь раньше [1].

5. Износ алитированного слоя.

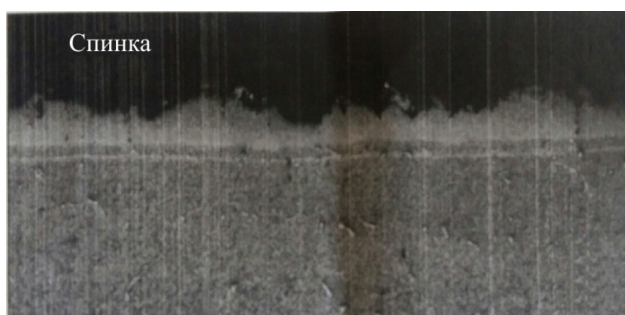
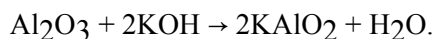


Рис. 6. Алитированный слой рабочей лопатки первой ступени ГТД после эксплуатации [1]. $\times 400$

Уменьшение алитированного слоя является одним из главных дефектов на лопатках ГТД. Причиной износа алитированного слоя является эрозия. Механическое воздействие потока газа, жидкости и твердых частиц приводит к уменьшению толщины диффузионного слоя.

Для устранения дефектов, вызванных подготовкой поверхности перед нанесением алитированного слоя, предлагается [2] применение галоидной (фторуглеродной) очистки перед диффузионным насыщением¹. Метод основан на термическом разложении политетрафторэтилена с образованием C₂F₄ и последующей парогазовой реакции. Данный метод не подходит для очистки внутренней поверхности лопаток ГТД ввиду того, что сопровождается изменением геометрии внутренних охлаждаемых каналов.

Сравнительные исследования различных способов удаления керамических стержней на основе корунда из охлаждаемых лопаток турбины показали, что технология автоклавного выщелачивания не приводит к макротравлению металлической матрицы жаропрочных никелевых сплавов [3, 4]. Гидротермическая автоклавная обработка рабочих лопаток ГТД в концентрированных щелочных растворах при термодинамических параметрах флюидного состояния электролита² позволяет удалять внедренные частицы корунда без изменения геометрических размеров проточной поверхности пера и охлаждаемых каналов лопаток по реакции



Сформировавшееся диффузионное покрытие соответствует техническим требованиям как по толщине, так и по микроструктуре. Пористый рельефный слой материала лопатки, образующийся в процессе гидроабразивной обработки лопаток и последующего удаления частиц корунда, полностью поглощен реакционной зоной, формирующей защитное диффузионное покрытие в процессе вакуумного отжига.

Таким образом, для предотвращения описанных выше дефектов необходимо:

- исключить процесс гидроабразивной обработки лопаток из технологии их изготовления,
- перейти на бесприпускное литье,

¹ Pat. 4.188.237 United States. Method for cleaning metal parts with elemental fluorine / Appl. No.: 874,915. Filed: Feb. 2, 1978; Pat. 4.324.594 United States. Method for cleaning metal parts / Appl. No.: 119,060. Filed: Feb. 6, 1980; Pat. 4.328.044 United States. Method for cleaning metal parts / Appl. No.: 119,061. Filed: Feb. 6, 1980; Pat. 4.405.379 United States. Method for cleaning metal parts / Appl. No.: 314,594. Filed: Oct. 26, 1981.

² Пат. 2151026 РФ, МПК B22F3/14. Изостат для обработки материалов в жидкости / Губенко Л.А., Сноп В.И.; № 99123273/02, заявл. 10.11.1999; опубл. 20.06.2000; Пат. 2245220 РФ, МПК B22F3/14. Изостат для обработки материалов и способ удаления керамического материала из металлических изделий с его использованием / Сноп В.И.; Заявка № 2003134260/02, 26.11.2003; опубл. 27.01.2005.

– включить в процесс изготовления лопаток ГТД технологию гидротермической автоклавной щелочной очистки поверхности перед диффузионным насыщением.

Список литературы

1. Никитин В.И. Коррозия и защита лопаток газовых турбин. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.

2. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Карачевцев Ф.Н. Обеспечение качества рабочих лопаток турбины при нанесении защитных диффузионных покрытий [Электронный ресурс]. – URL: <https://viam.ru/public/files/2012/2012-206186.pdf> (дата обращения: 20.01.2019).

3. Технология удаления керамических стержней из охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей / В.А. Поклад, О.Г. Оспенникова, М.Р. Орлов, М.А. Судинин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 9 (35). – С. 24–30.

4. Оспенникова О.Г., Орлов М.Р., Губенко Л.А. Обеспечение качества поверхности лопаток в процессе гидротермического выщелачивания керамических стержней // Литейное производство. – 2007. – № 8. – С. 31–34.

Получено 23.01.2019

Князев Даниил Александрович – магистр кафедры металловедения, термической и лазерной обработки металлов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: knyazevdanill@yandex.ru.

Силина Ольга Валентиновна – канд. техн. наук, доцент кафедры металловедения, термической и лазерной обработки металлов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: silina-olga@mail.ru.