

УДК 669.018.44:669.245

Д.А. Добрынин¹, М.С. Алексеева¹, А.Н. Афанасьев-Ходыкин¹**РЕМОНТ ДЕТАЛЕЙ ГОРЯЧЕГО ТРАКТА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА МАРКИ ЖС6У**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-3-13

Приведен обзор традиционных методов очистки поверхности лопаток газотурбинного двигателя (ГТД) от продуктов газовой коррозии и отработанного покрытия, методов восстановления структуры и свойств материала лопаток с помощью горячего изостатического прессования и термической обработки, а также способов нанесения покрытий на внутреннюю и внешнюю поверхности лопаток. Описаны основные недостатки данных методов, с учетом которых во ФГУП «ВИАМ» разработана современная технология ремонта сопловых лопаток ГТД из сплава марки ЖС6У, обеспечивающая повышение их ресурса и снижение затрат при ремонте.

Ключевые слова: ремонт сопловых лопаток газотурбинного двигателя; жаропрочный никелевый сплав марки ЖС6У; отработанное диффузионное алюминидное покрытие; горячее изостатическое прессование; термическая, гидротермическая и термохимическая обработки; электролитно-плазменное удаление покрытия; ремонт методом пайки.

D.A. Dobrynin¹, M.S. Alekseeva¹, A.N. Afanasyev-Khodykin¹**REPAIR OF NOZZLE BLADES MADE OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY ZhS6U**

An overview of traditional methods for cleaning the surface of gas turbine engine (GTE) blades from products of gas corrosion and spent coating, methods for restoring the structure and properties of the material of blades using hot isostatic pressing and heat treatment, as well as methods for applying coatings on the inner and outer surfaces of the blades is presented. The main disadvantages of these methods are described, taking into account which the state-of-the-art technology for repairing gas-turbine engine nozzle blades made of ZhS6U alloy has been developed in FSUE «VIAM», which ensures an increase in their resource and a reduction in repair costs.

Keywords: repair of gas turbine engine nozzle blades; high-temperature nickel alloy ZhS6U; spent diffusion aluminide coating; hot isostatic pressing; thermal, hydrothermal and thermochemical treatment; electrolytic-plasma removal of the coating; repair by soldering.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Лопатки газотурбинных двигателей (ГТД) в процессе эксплуатации подвергаются воздействию высоких температур, химическому воздействию продуктов сгорания топлива и механическому воздействию частиц пыли, в результате чего на их поверхности возникают различного рода дефекты: трещины, коррозионные и эрозионные повреждения покрытия и материала основы [1–8]. Кроме того, происходит изменение структуры материала лопаток, выражающееся в изменении морфологии γ' -фазы. Совокупное воздействие перечисленных факторов приводит к невозможности дальнейшей

эксплуатации лопаток. Значительное продление срока эксплуатации возможно при восстановлении структуры материала лопаток и устранении дефектов поверхности.

Существующие в настоящее время технологии ремонта [9] позволяют увеличить ресурс отремонтированных лопаток ГТД на уровне 50 % от ресурса новых лопаток. Повышение данного показателя возможно благодаря применению новых технологий ремонта, включающих очистку поверхности лопаток от продуктов высокотемпературного окисления, химической коррозии и покрытий после наработки с дальнейшим восстановлением структуры материала основы и геометрической формы лопаток, а также нанесение защитного покрытия на их поверхности.

На отечественных предприятиях авиационной отрасли, как правило, для очистки поверхности лопаток от продуктов высокотемпературного окисления и химической коррозии используется метод химической обработки в растворах на основе агрессивных и токсичных веществ (1-го и 2-го классов опасности). В патенте [10] описан способ очистки внутренней полости лопаток с применением фторсодержащих веществ. В работе [11] для очистки используют растворы на основе фтористоводородной кислоты с добавлением йод- и (или) бромсодержащих соединений. В патентах [12, 13] представлен способ электрохимической очистки поверхности деталей в электролите на основе ортофосфорной кислоты. В работе [14] рассмотрен метод очистки поверхности лопаток по двухэтапной схеме: на первом этапе лопатку выдерживают в растворе серной кислоты, на втором этапе проводят ультразвуковую обработку в нагретом водном растворе щелочи. Недостатками указанных способов очистки являются высокая экологическая нагрузка на окружающую среду и рабочий персонал, взрывоопасность используемых веществ, а также насыщение поверхности лопаток водородом, приводящее к охрупчиванию их поверхности.

После очистки поверхности проводят удаление покрытий после наработки. Наиболее распространенными методами, применяемыми в России, являются химический и электрохимический.

В патентах [15–17] описаны методы электрохимического удаления покрытий после наработки в электролитах на основе неорганических кислот. В работах [18, 19] для удаления покрытий предложено использовать химическое травление лопаток в растворах сильных кислот. Методам химического и электрохимического удаления покрытий присущ ряд существенных недостатков: токсичность и агрессивность используемых компонентов растворов и электролитов (веществ 1-го и 2-го классов опасности), низкая избирательность процессов по отношению к материалу основы и, как следствие, возможное растравливание материала основы с образованием питтингов.

После процесса удаления покрытий проводят восстановление структуры и свойств сплава, из которого изготовлены лопатки, а также геометрической формы поврежденных участков с использованием метода высокотемпературной пайки. Для восстановления структуры сплава применяют методы термообработки по специально подобранным температурным режимам и методы горячего изостатического прессования (ГИП) в комбинации с термообработкой [20–22]. В основном восстановительная термическая обработка никелевых жаропрочных сплавов состоит из следующих операций:

- гомогенизирующий отжиг для снятия внутренних напряжений и растворения избыточных фаз, выделившихся в процессе эксплуатации лопаток;
- закалка для растворения упрочняющей γ' -фазы неправильной формы;
- старение для формирования регламентированных выделений γ' -фазы.

В зависимости от материала лопаток отдельные операции восстановительной термической обработки можно исключить, а также объединить между собой или с операцией ГИП.

Для устранения пористости в сплавах часто применяется метод ГИП, описанный в работах [23–25]. В результате обработки повышаются механические свойства и служебные характеристики сплава, из которого изготовлены лопатки, обеспечивается уменьшение размера пор и(или) полное их устранение.

При эксплуатации ГТД лопатки работают в сложных условиях интенсивного горячего газового потока, в результате чего на них появляются такие дефекты, как эрозионный износ, забоины, трещины, прогары и эксплуатационный износ. Для восстановления геометрической формы лопаток используют методы сварки (в основном для восстановления наплавкой бандажных полок и реборд) и пайки. При использовании метода сварки, несмотря на его относительную простоту, невозможно отремонтировать детали из никелевых жаропрочных сплавов с высоким содержанием γ' -фазы из-за их склонности к горячим трещинам. Остальные типы дефектов в основном исправляются методом высокотемпературной пайки с использованием вставок из материала лопаток, никелевой сетки и наполнителей в виде порошков жаропрочных сплавов.

После восстановления структуры и свойств сплава, из которого изготовлены лопатки, а также геометрической формы поврежденных участков методом пайки проводят нанесение покрытий на поверхность лопаток. В патенте [26] описан метод диффузионного порошкового нанесения жаростойкого покрытия на основе алюминия (метод диффузионного порошкового алитирования), значительным недостатком которого является низкая воспроизводимость толщины и состава покрытия. Решение данной проблемы представлено в изобретении [27], описывающем состав смеси для многократного диффузионного хромоалитирования с соблюдением толщины и состава покрытия.

В связи с тем, что описанные методы очистки лопаток от продуктов высокотемпературного окисления, химической коррозии и покрытий после наработки не соответствуют критериям современных производств, во ФГУП «ВИАМ» разработана современная комплексная технология ремонта сопловых лопаток из жаропрочного никелевого сплава марки ЖС6У после эксплуатации, обеспечивающая повышение их ресурса и снижение затрат при ремонте ГТД. По разработанной технологии проведен ремонт фрагментов лопаток после эксплуатации, результаты которого отражены в данной статье.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие коррозионные и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [28].

Материалы и методы

Для работы использовали фрагменты сопловых лопаток из сплава ЖС6У после эксплуатации, прошедшие дефектоскопический контроль на наличие трещин в материале основы. Химический состав сплава марки ЖС6У, из которого изготовлены фрагменты лопаток, следующий (в % (по массе)):

Al	Co	Cr	Mo	Nb	Ti	W	P	C	B	Fe	Si	Mn
5,2–5,8	9,4–10,4	8,6–9,3	1,2–1,6	0,8–1,2	2,2–2,8	9,8–10,5	≤0,01	0,13–0,19	≤0,035	≤0,5	≤0,25	≤0,2

Очистку фрагментов лопаток от продуктов высокотемпературного окисления и химической коррозии, а также удаление покрытия после наработки с их внутренней

полости проводили с использованием двух методов – гидротермической обработки в автоклаве в растворе гидроксида щелочного металла и термохимической обработки в расплаве бифторида щелочного металла.

Удаление диффузионного алюминидного покрытия после наработки с внешней поверхности фрагментов лопаток выполняли электролитно-плазменным методом (разновидность методов электрохимической обработки) на разработанной во ФГУП «ВИАМ» установке, которая состоит из электролитической ванны, системы поддержания температуры и фильтрации электролита, источника питания и блока управления установкой и может быть использована для проведения химических, электрохимических и электролитно-плазменных процессов.

Металлографические исследования для оценки полноты удаления диффузионного алюминидного покрытия после наработки с поверхности фрагментов лопаток и оценки толщины нанесенного диффузионного алюминидного покрытия проводили на металлографическом микроскопе Olympus GX51 с цифровой системой обработки изображений.

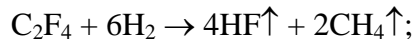
Металлофизические исследования поверхности фрагментов лопаток после удаления диффузионного алюминидного покрытия осуществляли на растровом электронном микроскопе с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа.

Результаты и обсуждение

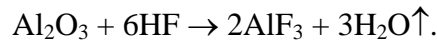
Наиболее эффективным методом очистки лопаток ГТД от продуктов высокотемпературного окисления и газовой коррозии считается галоидная обработка – процесс фторуглеродной очистки, разработанный фирмой Dayton Process B.V. [29–32].

При галоидной очистке протекают следующие химические реакции:

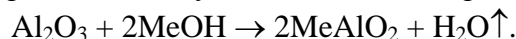
– термическое разложение политетрафторэтилена с образованием C_2F_4 и последующей парогазовой реакцией:



– преобразование устойчивого оксида Al_2O_3 во фторид с помощью фтористоводородной кислоты:

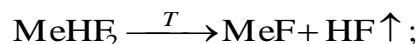


Для снижения экологической нагрузки на рабочий персонал и окружающую среду предложено вместо метода галоидной очистки использовать метод гидротермической обработки фрагментов лопаток в автоклаве в концентрированных щелочных растворах, при котором протекает следующая химическая реакция:

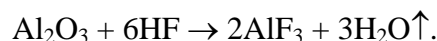


Опробован также аналог метода галоидной очистки – термохимическая очистка в расплаве бифторида щелочного металла, при которой протекают следующие химические реакции:

– термическое разложение бифторида щелочного металла с образованием фтористоводородной кислоты:



– взаимодействие оксида Al_2O_3 с фтористоводородной кислотой с образованием трифторида AlF_3 :



Внешний вид поверхности фрагмента сопловой лопатки из жаропрочного сплава марки ЖС6У после эксплуатации до операции очистки от продуктов высокотемпературного окисления и газовой коррозии представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид поверхности фрагмента сопловой лопатки из сплава марки ЖС6У после эксплуатации

Результаты металлографических исследований показали, что толщина отработанного диффузионного алюминидного покрытия на внешней поверхности фрагментов сопловых лопаток составляет от 90 до 100 мкм, на поверхности внутренних полостей – до 5 мкм (рис. 2).

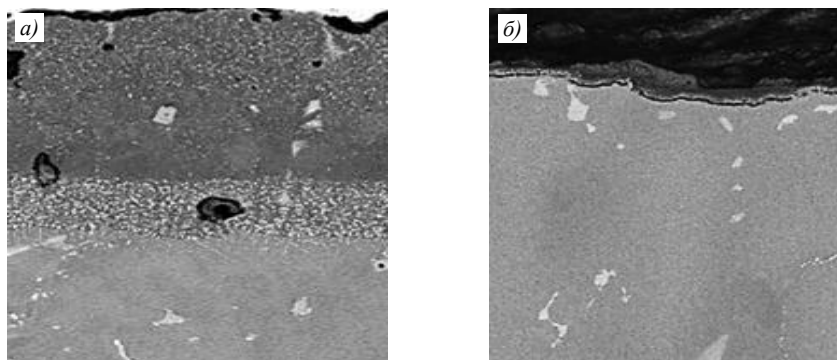


Рис. 2. Микроструктуры ($\times 500$) покрытия на наружной (а) и внутренней (б) поверхностях фрагментов сопловых лопаток из сплава марки ЖС6У после эксплуатации

Разработаны режимы гидротермической и термохимической обработок фрагментов лопаток от продуктов высокотемпературного окисления и газовой коррозии, проведена их очистка по данным режимам.

Внешний вид поверхности фрагментов сопловых лопаток из жаропрочного сплава марки ЖС6У после гидротермической и термохимической очисток приведен на рис. 3.

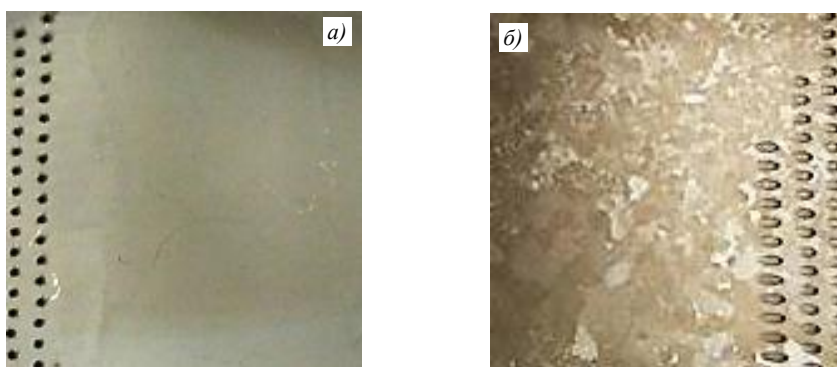


Рис. 3. Внешний вид поверхности фрагментов сопловых лопаток из сплава марки ЖС6У после гидротермической (а) и термохимической очисток (б)

При гидротермической обработке осуществляются очистка поверхности фрагментов лопаток от продуктов высокотемпературного окисления и газовой коррозии,

а также удаление отработанного диффузионного алюминидного покрытия толщиной до 5 мкм с поверхности их внутренних полостей. Однако происходит неполное удаление покрытия с внешней поверхности фрагментов лопаток. Полноту удаления покрытия определяли по проявлению макроструктуры основного материала. При термохимической обработке происходит полная очистка фрагментов лопаток от продуктов высокотемпературного окисления, газовой коррозии и отработанного диффузионного алюминидного покрытия: на их поверхности видна макроструктура основного материала. Локальные остатки покрытия с внешней поверхности и поверхности внутренних полостей фрагментов лопаток удаляли с помощью пескоструйной и гидropескоструйной обработки перед операцией нанесения покрытия.

Для удаления отработанного диффузионного алюминидного покрытия с внешней поверхности фрагментов лопаток, оставшегося после гидротермической очистки, использовали электролитно-плазменную обработку в электролите на основе неорганической соли (разновидность методов электрохимической очистки при высоких напряжениях). Полноту удаления покрытия регистрировали по проявлению макроструктуры основного материала на внешней поверхности фрагментов лопаток и контролировали при проведении металлографических исследований.

Внешний вид поверхности фрагментов сопловой лопатки из жаропрочного сплава марки ЖС6У до и после электролитно-плазменной обработки приведен на рис. 4.

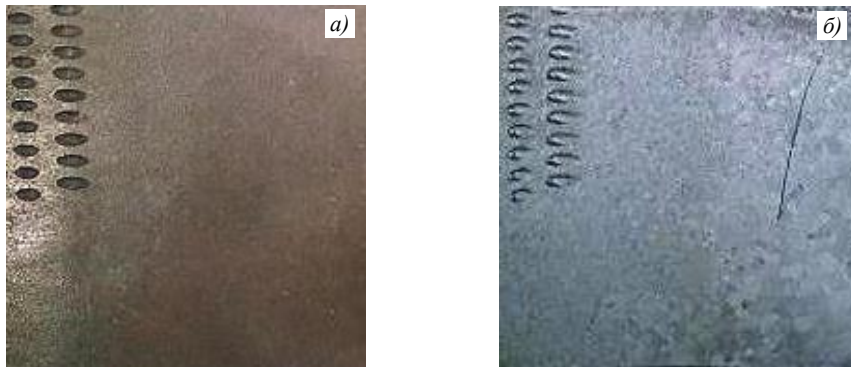


Рис. 4. Внешний вид поверхности фрагментов сопловой лопатки из сплава марки ЖС6У до (а) и после электролитно-плазменной обработки (б)

На рис. 5 представлены микроструктуры поверхности внутренней полости фрагмента сопловой лопатки из сплава марки ЖС6У после гидротермической обработки и внешней поверхности фрагмента лопатки после электролитно-плазменного удаления остатков отработанного алюминидного диффузионного покрытия.

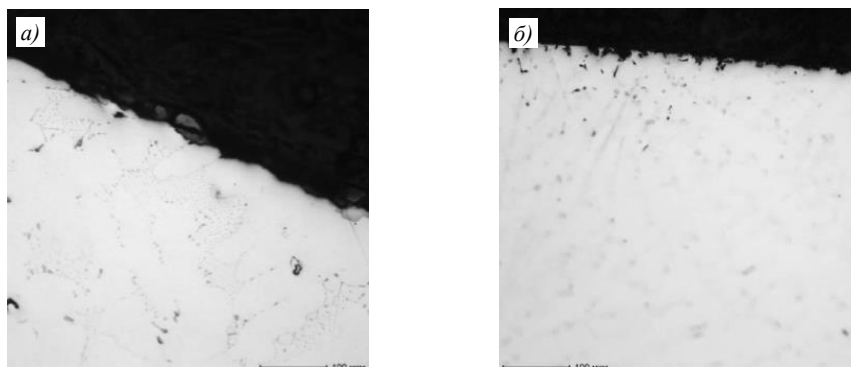


Рис. 5. Микроструктуры ($\times 200$) поверхности внутренней полости и внешней поверхности фрагментов лопатки из сплава марки ЖС6У после гидротермической обработки (а) и электролитно-плазменного удаления остатков отработанного алюминидного диффузионного покрытия (б) соответственно

На рис. 6 приведены результаты рентгеноспектрального анализа внешней поверхности фрагмента сопловой лопатки из сплава марки ЖС6У после электролитно-плазменного удаления отработанного диффузионного алюминидного покрытия, согласно которым химический состав поверхности соответствует составу сплава, следов покрытия не обнаружено.

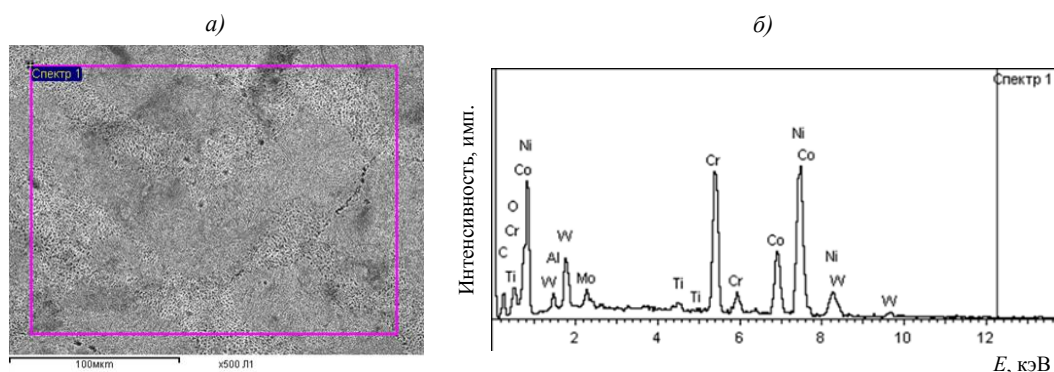


Рис. 6. Участок рентгеноспектрального анализа (а, $\times 500$) и спектрограмма (б) внешней поверхности фрагмента сопловой лопатки из сплава марки ЖС6У после электролитно-плазменного удаления отработанного диффузионного алюминидного покрытия

Методом просвечивающей электронной микроскопии исследована структура фрагментов сопловых лопаток из сплава марки ЖС6У после эксплуатации в исходном состоянии. По результатам исследований установлено, что в материале основы γ' -фаза утрачивает свою кубическую огранку, происходят коагуляция и сращивание частиц упрочняющей γ' -фазы и образование в ней диффузионных пор. Данные превращения являются обратимыми. В свою очередь, в структуре не обнаружено топологически плотноупакованных фаз, которые образуются в результате необратимых структурных превращений.

Для устранения обратимых превращений структуры проведено ГИП с последующей термообработкой по разработанным режимам фрагментов лопаток из указанного сплава после электролитно-плазменного удаления отработанного диффузионного алюминидного покрытия.

По результатам металлографических исследований фрагментов лопаток из сплава марки ЖС6У после ГИП с последующей термической обработкой установлено, что кубическая морфология γ' -фазы восстановлена, диффузионная пористость устранена (рис. 7).

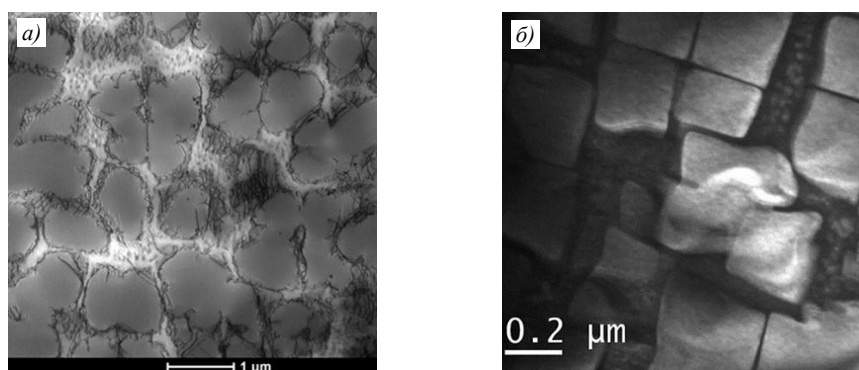


Рис. 7. Структура материала фрагментов сопловой лопатки из сплава марки ЖС6У до (а) и после горячего изостатического прессования с последующей термической обработкой (б)

Результаты дефектоскопического контроля фрагментов лопаток из сплава марки ЖС6У показали, что после операции ГИП с последующей термической обработкой на поверхности полков фрагментов лопаток обнаружены дефекты в виде усталостных трещин.

Перед ремонтом методом пайки трещины зачищали абразивным инструментом. Внешний вид трещин на поверхности фрагментов сопловых лопаток и мест их зачистки приведен на рис. 8.

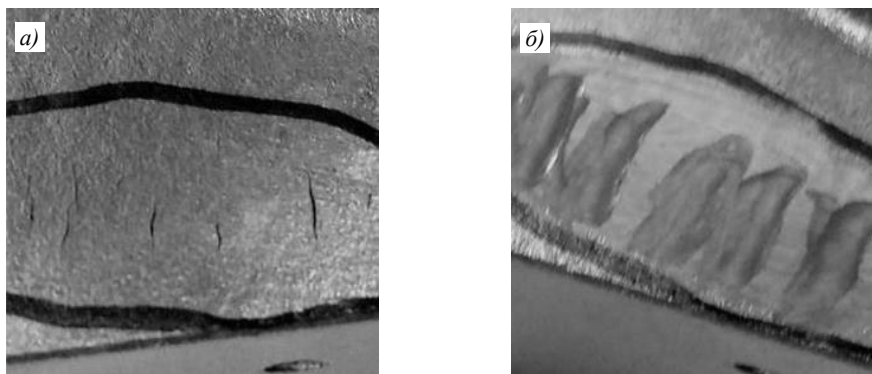


Рис. 8. Внешний вид трещин (а) и мест их зачистки (б) на поверхности фрагментов сопловых лопаток из сплава марки ЖС6У

Для ремонта фрагментов сопловых лопаток из сплава марки ЖС6У использовали пасту и ленту композиционного припоя, разработанные во ФГУП «ВИАМ». Места разделок локальных трещин заполняли пастой, а места зачисток большой площади покрывали лентой.

Внешний вид дефектных мест фрагментов лопаток из указанного сплава после укладки припоя приведен на рис. 9.

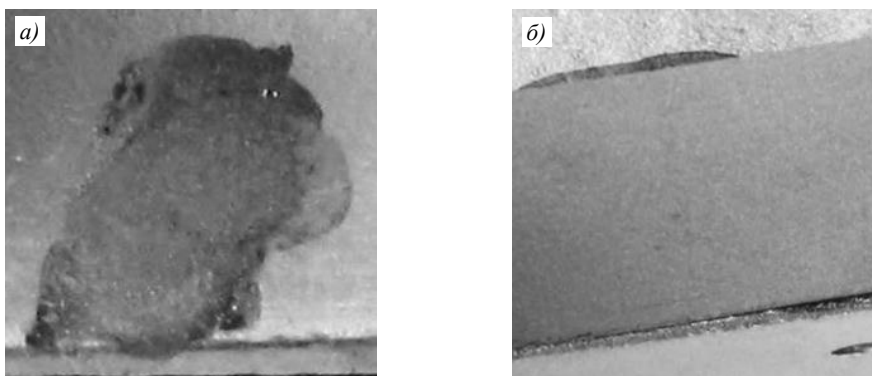


Рис. 9. Внешний вид дефектных мест фрагментов лопаток из сплава марки ЖС6У после укладки композиционного припоя в виде пасты (а) и ленты (б)

После укладки припоя проведены пайка фрагментов сопловых лопаток из сплава марки ЖС6У по разработанной технологии и механическая обработка мест пайки абразивным инструментом. Результаты дефектоскопического контроля фрагментов лопаток после ремонта показали отсутствие дефектов на отремонтированных участках.

На отремонтированные фрагменты сопловых лопаток из жаропрочного сплава марки ЖС6У по технологии порошкового алитирования нанесено диффузионное алюминидное покрытие. Внешний вид поверхности фрагмента лопатки с нанесенным покрытием приведен на рис. 10.

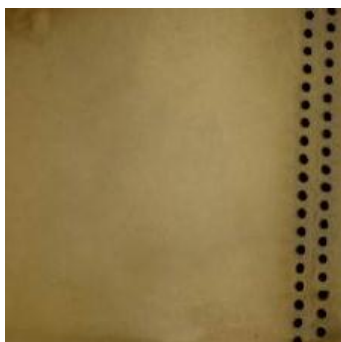


Рис. 10. Внешний вид поверхности фрагмента сопловой лопатки из сплава марки ЖС6У с нанесенным диффузионным алюминидным покрытием

Для проверки целостности нанесенного покрытия после ремонта проведен дефектоскопический контроль внешней поверхности фрагментов сопловых лопаток из сплава марки ЖС6У, результаты которого показали, что дефекты в покрытии отсутствуют.

По результатам металлографических исследований установлено: толщина покрытия на внутренней полости фрагментов лопаток составляет до 15 мкм, на внешней поверхности – до 30 мкм.

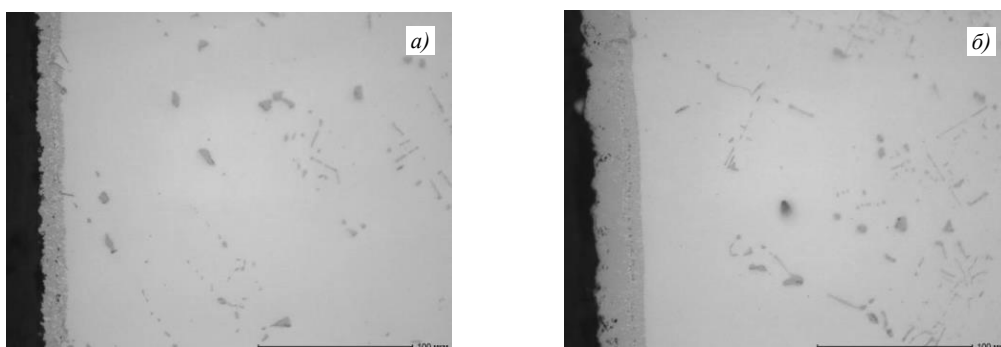


Рис. 11. Микроструктуры ($\times 500$) поверхности фрагментов сопловой лопатки из сплава марки ЖС6У с диффузионным алюминидным покрытием, нанесенным на ее внутреннюю полость (а) и внешнюю поверхность (б)

Микроструктуры поверхности фрагментов сопловой лопатки из сплава марки ЖС6У с нанесенным диффузионным алюминидным покрытием приведены на рис. 11.

Заключения

Во ФГУП «ВИАМ» разработана современная комплексная технология ремонта сопловых лопаток ГТД из жаропрочного никелевого сплава марки ЖС6У после эксплуатации, включающая операции очистки их поверхности от продуктов высокотемпературного окисления, газовой коррозии и отработанного диффузионного алюминидного покрытия, восстановления структуры и свойств материала лопаток с помощью ГИП и термической обработки, восстановления геометрической формы поврежденных участков их поверхности методом пайки и нанесения диффузионного алюминидного покрытия на внутреннюю полость и внешнюю поверхность лопаток.

Для снижения экологической нагрузки на рабочий персонал и окружающую среду предложена замена традиционному методу фторуглеродной очистки от продуктов высокотемпературного окисления, газовой коррозии и отработанного покрытия с использованием веществ 2-го класса опасности – очистка поверхности лопаток

по двухэтапной схеме, состоящая из гидротермической обработки лопаток в автоклаве в концентрированных щелочных растворах и последующей электролитно-плазменной обработки с использованием веществ 2-го и 3-го классов опасности. Комбинированная очистка позволяет проводить полное удаление продуктов высокотемпературного окисления, газовой коррозии и отработанного покрытия. Для контроля полноты удаления покрытия можно применять простой визуальный метод – проявление макроструктуры материала основы, что значительно облегчает определение момента окончания процесса.

Показано, что для устранения обратимых превращений структуры сопловых лопаток из жаропрочного сплава марки ЖС6У может использоваться метод ГИП с последующей термической обработкой. Применение такой комбинации позволяет восстановить кубическую морфологию γ' -фазы и устранить диффузионную пористость.

Для ремонта дефектных мест на лопатках, выявленных при дефектоскопическом контроле после ГИП с термообработкой, предложено использовать метод пайки с последующей механической обработкой мест пайки, который позволяет эффективно устранить дефекты на поверхности лопаток и подготовить их для нанесения покрытия по технологии порошкового алитирования.

Таким образом, разработанная технология может быть рекомендована для внедрения на предприятиях авиационной отрасли для ремонта сопловых лопаток ГТД.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 60–70.
2. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Защитные покрытия лопаток турбин перспективных ГТД // *Газотурбинные технологии*. 2001. № 3. С. 30–32.
3. Попова С.В., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Добрынин Д.А. Особенности электролитно-плазменного травления жаростойких покрытий с поверхности деталей из жаропрочных никелевых сплавов // *Труды ВИАМ*. 2016. № 2 (38). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-4-4.
4. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // *Металлы*. 2007. № 5. С. 23–34.
5. Косьмин А.А., Будиновский С.А., Мубояджян С.А. Жаро- и коррозионностойкое покрытие для рабочих лопаток турбины из перспективного жаропрочного сплава ВЖЛ21 // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 1 (46). С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-17-24.
6. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Ионно-плазменная технология: перспективные процессы, покрытия, оборудование // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 39–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-39-54.
7. Тихомирова Е.А., Будиновский С.А., Живушкин А.А., Сидохин Е.Ф. Особенности развития термической усталости в деталях из жаропрочных сплавов с покрытием // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 3 (48). С. 20–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-20-25.
8. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Высокоэффективное охлаждение лопаток горячего тракта ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 2 (47). С. 3–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-3-14.
9. Process for treating the surface of a component, made from a Ni based superalloy, to be coated: pat. US 6440238B1; filed 09.08.99; publ. 27.08.02.
10. Способ обработки каналов охлаждения лопаток турбины газотурбинного двигателя: пат. 2417145C2 Рос. Федерация; заявл. 15.07.09; опубл. 27.04.11.
11. Контактный раствор, способ и установка для очистки поверхности металлических сплавов, в том числе поверхности трещин и узких зазоров: пат. 2419684C2 Рос. Федерация; заявл. 04.06.09; опубл. 27.05.11.

12. Способ электрохимической очистки металлических изделий: пат. 2411310С2 Рос. Федерация; заявл. 20.02.09; опубл. 10.02.11.
13. Способ электрохимической очистки металлических изделий: пат. 2099445С1 Рос. Федерация; заявл. 22.07.94; опубл. 20.12.97.
14. Способ очистки металлических поверхностей от отложений: пат. 2169794С1 Рос. Федерация; заявл. 15.11.00; опубл. 27.06.01.
15. Способ удаления покрытия с металлической подложки: пат. 2094546С1 Рос. Федерация; заявл. 03.04.95; опубл. 27.10.97.
16. Способ удаления жаростойкого металлического покрытия: пат. 2228396С1 Рос. Федерация; заявл. 19.09.02; опубл. 10.05.04.
17. Устройство и способ для удаления покрытия: пат. 2215068С2 Рос. Федерация; заявл. 17.12.00; опубл. 27.10.03.
18. Способ удаления жаростойкого покрытия с деталей из жаропрочных никелевых сплавов: пат. 2339738С1 Рос. Федерация; заявл. 27.03.07; опубл. 27.11.08.
19. Способ удаления покрытий с деталей из жаростойких сплавов: пат. 2200211С2 Рос. Федерация; заявл. 07.03.01; опубл. 10.03.03.
20. Никелевый жаропрочный сплав, изделие, выполненное из него, и способ термообработки сплава и изделия из него: пат. 2220220С1 Рос. Федерация; заявл. 05.08.02; опубл. 27.12.03.
21. Способ термической обработки деталей из жаропрочных сплавов на основе никеля: пат. 2232204С2 Рос. Федерация; заявл. 09.09.02; опубл. 10.07.04.
22. Способ восстановительной термической обработки изделий из жаропрочных никелевых сплавов: пат. 2459885С1 Рос. Федерация; заявл. 15.07.11; опубл. 27.08.12.
23. Способ защиты поверхности лопатки: пат. 2252110С1 Рос. Федерация; заявл. 09.10.03; опубл. 20.05.05.
24. Способ восстановительного ремонта деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов: пат. 2346799С2 Рос. Федерация; заявл. 01.03.07; опубл. 20.02.09.
25. Способ обработки отливок с монокристаллической структурой из жаропрочных никелевых сплавов с горячим изостатическим прессованием: пат. 2380454С1 Рос. Федерация; заявл. 11.06.08; опубл. 27.01.10.
26. Способ нанесения комбинированного покрытия: пат. 2244041С1 Рос. Федерация; заявл. 29.04.03; опубл. 10.01.05.
27. Состав смеси для многократного хромоалитирования: пат. 2266349С1 Рос. Федерация; заявл. 07.06.04; опубл. 20.12.05.
28. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
29. 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.
30. Орлов М.Р. Образование пор в монокристаллических рабочих лопатках турбины в процессе направленной кристаллизации // *Металлы*. 2008. № 1. С. 70–75.
31. Орлов М.Р. Физико-химические особенности образования пор термического происхождения и работоспособность монокристаллических лопаток турбины // *Деформация и разрушение материалов*. 2008. № 6. С. 43–48.
32. Орлов М.Р., Орлов Е.М. Водородная хрупкость монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // *Деформация и разрушение материалов*. 2008. № 7. С. 36–41.