

УДК 629.7.083

Д.А. Добрынин<sup>1</sup>, Т.В. Павлова<sup>1</sup>, А.Н. Афанасьев-Ходыкин<sup>1</sup>, М.С. Алексеева<sup>1</sup>

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ РЕМОНТА ЛОПАТОК ГТД

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-18-26

*Приведен сравнительный обзор традиционных методов (механического, химического и электрохимического) удаления защитных покрытий с поверхности лопаток ГТД с методом электролитно-плазменного удаления покрытий. Осуществлен комплексный ремонт рабочих лопаток ГТД из сплавов типа ЖС, включающий операции очистки внешней поверхности лопаток от нагара, продуктов газовой коррозии и отработанных покрытий состава MeCrAlY с использованием технологии электролитно-плазменного удаления покрытий, горячего изостатического прессования (ГИП) и термической обработки с целью восстановления структуры материала лопаток, дефектоскопического контроля и пайки поврежденных участков поверхности, механической обработки мест пайки, операции нанесения покрытий состава MeCrAlY на внешнюю поверхность лопаток. Показано, что способ электролитно-плазменного удаления покрытий может стать заменой традиционным методам удаления покрытий при ремонте лопаток ГТД.*

**Ключевые слова:** электролитно-плазменное удаление покрытий, жаростойкие покрытия состава MeCrAlY, комплексный ремонт лопаток ГТД.

D.A. Dobrynin<sup>1</sup>, T.V. Pavlova<sup>1</sup>, A.N. Afanasyev-Khodykin<sup>1</sup>, M.S. Alekseeva<sup>1</sup>

## THE USE OF ELECTROLYTIC-PLASMA TREATMENT FOR REPAIR OF GTE BLADES

*A comparative review of traditional methods (mechanical, chemical and electrochemical) of removing protective coatings from the surface of GTE blades with the method of electrolytic-plasma removal of coatings is presented. Comprehensive repair of GTE working blades made from alloys such as ZhS, including cleaning the outer surface of the blades from carbon deposits, gas corrosion products and spent coatings of MeCrAlY composition, using the technology of electrolytic-plasma removal of coatings, hot isostatic pressing (HIP) and heat treatment to restoration of the structure of the material of the blades, flaw detection control and soldering of damaged surface areas, mechanical processing of soldering sites, the operation of coating the composition MeCrAlY on the outer surface of the blades. It is shown that the method of electrolytic-plasma removal of coatings can be a substitute for traditional methods for removing coatings when repairing gas turbine engine blades.*

**Keywords:** electrolytic-plasma coating removal, MeCrAlY heat-resistant coatings, comprehensive repair of GTE blades.

---

<sup>1</sup>Федеральное 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

При эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) защитные покрытия [1–8] на поверхности лопаток подвергаются механическим, температурным и химическим воздействиям. Происходит высокотемпературное окисление покрытий, отложение продуктов

горения топлива на их поверхности и механическое повреждение покрытий, выражающееся в образовании сколов, трещин и отслоении покрытий от материала основы лопаток. При ремонте лопаток [9], как правило, продукты нагара и оксидный слой удаляют пескоструйной или гидropескоструйной обработкой, после чего производят удаление отработанных защитных покрытий, используя традиционные методы обработки – механическую, химическую и электрохимическую.

Наибольшее количество разработок в области удаления отработавших ресурс жаростойких покрытий принадлежит американским и европейским компаниям. Компания Huffman Corporation (США) предлагает для удаления жаростойких покрытий использовать механическую обработку струей воды с абразивными частицами под давлением от 34 до 374,3 МПа [10]. Компания Alstom Technology Ltd (Швейцария) предлагает комбинированный способ химико-механического удаления поврежденных слоев жаростойких покрытий состава  $MeCrAlY$ . Поврежденный слой покрытия обрабатывают фтористым водородом, фтором, политетрафторэтиленовой смолой или фторидом аммония для разрыхления. После этого проводят гидроабразивную обработку поверхности лопаток с низким содержанием абразива и малым размером частиц от продуктов травления покрытия, чтобы не повредить неповрежденные слои покрытия [11, 12]. Компания Siemens Aktiengesellschaft (Германия) предлагает подобный способ удаления жаростойких покрытий состава  $MeCrAlY$ : внешнюю часть покрытия (от 70 до 95% от общей толщины покрытия) удаляют гидроабразивной обработкой при давлении струи от 0,98 до 9,8 МПа. Во избежание повреждения геометрической формы основы, внутренний слой покрытия удаляют химически в растворе соляной кислоты [13]. Компания Man Turbo AG (Германия) предлагает перед удалением жаростойких покрытий состава  $MeCrAlY$  проводить газовое алитирование покрытия для формирования хрупкого слоя  $\beta$ -NiAl над внутренним диффузионным слоем. После чего наружный хрупкий слой удаляют пескоструйной обработкой до внутреннего диффузионного слоя, а диффузионный слой удаляют, используя шлифовальную и абразивную обработку [14]. Аналогичный способ разработан компаниями General Electric (США) [15] и Sermatech International Inc. (Ирландия) [16].

Несмотря на все разнообразие способов механического удаления защитных покрытий с поверхности лопаток ГТД, механическая обработка имеет ряд существенных недостатков: высокая трудоемкость, большие затраты расходуемых материалов и временные затраты, при механической обработке возможно повреждение геометрической формы обрабатываемого изделия и внедрение частичек абразивного материала в основу, являющихся концентраторами напряжений.

Среди методов химического удаления защитных покрытий с поверхности лопаток ГТД наибольшее распространение получили способы удаления защитных покрытий в растворах неорганических кислот (серной, соляной, фосфорной и азотной). Компания General Electric (США) [17] для селективного удаления жаростойких покрытий предлагает использовать концентрированные растворы на основе минеральных кислот – до 80% (по массе):  $H_xAF_6$  (A – Si, Ge, Ti, Zr, Al, Ga),  $HNO_3$ ,  $HCl$ ,  $H_3PO_4$ , при пониженных температурах. Компания Dayton Process B.V. (США) [18] предлагает для удаления защитных покрытий использовать фторуглеродную очистку, в основе которой термическое разложение политетрафторэтилена до тетрафторэтилена, и последующее гидрирование последнего с образованием фтористоводородной кислоты и этана. Компанией United Technologies Corporation (США) [19] предложен способ химического удаления жаростойких покрытий состава  $MeCrAlY$  в растворах на основе серной, соляной, фосфорной и плавиковой кислот или в их смесях с добавкой соединений трехвалентного железа ( $Fe^{3+}$ ) в количестве 5,5–6,5 г/л.

Что касается российских разработок, то наиболее распространенными методами удаления защитных покрытий с лопаток ГТД являются методы химической и электрохимической обработки.

В Уфимском государственном авиационном техническом университете разработан способ химического удаления жаростойких покрытий в растворах на основе азотной кислоты с добавками соляной кислоты и ингибиторов коррозии при температуре раствора не более 20°C [20]. Акционерное общество «НПЦ газотурбостроения «Салют» (г. Москва) предлагает для удаления жаростойких покрытий с лопаток ГТД использовать растворы, содержащие азотную и фтористоводородную кислоты с добавками порошка железа и оксида хрома [21]. По предложенному способу удаляют внешнее дефектное покрытие до внутреннего диффузионного слоя. Там же предложен способ для удаления продуктов высокотемпературного окисления, сульфидной коррозии и остатков отработанного защитного покрытия в расплаве бифторида калия с последующей щелочной обработкой [22].

Вопреки широкому распространению способов химического и электрохимического удаления защитных покрытий с лопаток ГТД как в России, так и за рубежом, эти методы обладают рядом существенных недостатков: при химическом удалении защитных покрытий происходит быстрая выработка («старение») растворов; компоненты, применяемые для приготовления растворов и электролитов, имеют высокую стоимость, токсичны, пожаро- и взрывоопасны, имеют высокую коррозионную активность по отношению к материалам оборудования, ввиду чего требуются специальные меры защиты персонала, окружающей среды и оборудования; растворы и электролиты, применяемые для химического и электрохимического удаления защитных покрытий, многокомпонентные – существует сложность их корректировки; при химическом удалении покрытия происходит насыщение поверхности выделяющимся водородом, в результате чего возможно водородное охрупчивание – «разрушение» материала основы.

Последние 15 лет в производство активно внедряется разновидность метода электрохимической обработки поверхности – электролитно-плазменная обработка. Отличие от электрохимической обработки заключается в том, что процесс проводят в электролитах на основе неорганических солей с концентрацией по основному веществу до 10% (по массе) и напряжениях обработки от 200 до 400 В в зависимости от состава обрабатываемого материала. При таких напряжениях вокруг обрабатываемого изделия формируется тонкая (от 50 до 100 мкм) парогазовая оболочка, отделяющая электролит от поверхности изделия с напряженностью электрического поля в оболочке от  $10^4$  до  $10^6$  В/м. Большие значения напряженности электрического поля в парогазовой оболочке являются причиной возникновения импульсных микроразрядов на микровыступах поверхности обрабатываемого изделия, которые оказывают электроэрозионное воздействие на обрабатываемую поверхность, приводящее к удалению отработанного защитного покрытия с поверхности изделия [23, 24].

Уфимским государственным авиационным техническим университетом предложен способ электролитно-плазменного удаления жаростойких и износостойких покрытий (карбидов, нитридов, покрытий системы NiCrAl) в нагретом от 50 до 90°C электролите на основе неорганической соли аммония с добавкой вещества органической природы и (или) неорганической соли при напряжениях обработки от 180 до 340 В [25]. Во ФГУП «ВИАМ» предложены способ электролитно-плазменного удаления жаростойких покрытий состава MeCrAlY в электролитах на основе неорганических кислот (азотной, серной, соляной и фосфорной) при напряжениях 220 и 380 В и переменном электрическом токе с частотой 50 Гц [26] и способ удаления алюминидного покрытия с использованием метода электролитно-плазменной обработки (при плотностях тока от 50 до

100 А/дм<sup>2</sup>) в электролитах на основе неорганических кислот с концентрацией по основному веществу до 12% (по массе) [27]. В ООО «НПП «Уралспецтехнология» (г. Уфа) предложен способ контроля полноты удаления защитных покрытий с деталей из жаропрочных сплавов с использованием технологии электролитно-плазменной обработки поверхности деталей в нагретых от 75 до 85°C электролитах на основе солей аммония при напряжениях от 280 до 300 В [28].

Неоспоримыми преимуществами электролитно-плазменной обработки по сравнению с методами механической, химической и электрохимической обработки поверхности являются высокая производительность процесса, невысокая стоимость компонентов электролитов, их малый расход и небольшая токсичность, возможность равномерной обработки изделий, имеющих сложную геометрическую форму, при использовании противоэлектродов, имитирующих геометрическую форму обрабатываемого изделия.

К главному недостатку описанных способов электролитно-плазменного удаления защитных покрытий можно отнести многокомпонентность применяемых электролитов, в результате чего возникает сложность в их корректировке. Поэтому во ФГУП «ВИАМ» разработан двухкомпонентный электролит на основе неорганической соли и подобраны режимы для удаления жаростойких покрытий состава MeCrAlY с поверхности лопаток ГТД из жаропрочных сплавов типа ЖС. По разработанным технологиям проведено удаление отработанных жаростойких покрытий состава MeCrAlY с внешней поверхности рабочих лопаток ГТД из сплавов типа ЖС при проведении комплексного ремонта лопаток, включающего: операции очистки внешней поверхности лопаток от нагара, продуктов газовой коррозии и отработанных покрытий; горячее изостатическое прессование (ГИП) и термическую обработку с целью восстановления структуры материала лопаток; дефектоскопический контроль и пайку поврежденных участков поверхности; механическую обработку мест пайки; операцию нанесения покрытий состава MeCrAlY на внешнюю поверхность лопаток.

В работе приведены результаты комплексного ремонта рабочих лопаток ГТД из сплавов типа ЖС и показана возможность использования метода электролитно-плазменной обработки для удаления отработанных жаростойких покрытий состава MeCrAlY.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионно- 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») [29].

### Материалы и методы

Для работы использовали годные по результатам дефектоскопического контроля (не имеющие сквозных трещин в теле лопатки) рабочие лопатки ГТД из сплавов типа ЖС с отработанными покрытиями состава MeCrAlY.

Очистку лопаток от нагара и продуктов газовой коррозии проводили пескоструйной обработкой электрокорундом фракций 25А, F100 в пескоструйной камере КСО-110-М.

Для удаления отработанных покрытий состава MeCrAlY с внешней поверхности лопаток использовали установку для электролитно-плазменной обработки поверхности, разработанную во ФГУП «ВИАМ».

Для восстановления структуры очищенных от отработанного покрытия лопаток проводили горячее изостатическое прессование (ГИП) и термическую обработку лопаток по режимам, разработанным во ФГУП «ВИАМ».

Дефектоскопический контроль лопаток проводили по ГОСТ 18442–80 с использованием метода капиллярного люминесцентного контроля с III классом чувствительности, обеспечивающим выявление дефектов с минимальной шириной раскрытия 10 мкм.

Для ремонта дефектов лопаток методом пайки использовали пасты композиционных припоев разработки ФГУП «ВИАМ».

Механическую обработку мест пайки лопаток проводили абразивными дисками толщиной 5 мм и шарошками различной формы (сферическими, цилиндрическими, коническими).

Для нанесения покрытий состава  $MeCrAlY$  на внешнюю поверхность лопаток использовали установку МАП-3 для ионно-плазменного напыления покрытий.

Металлографические исследования лопаток на полноту удаления отработанных покрытий и для оценки толщины нанесенных покрытий состава  $MeCrAlY$  на отремонтированные лопатки проводили на металлографическом микроскопе Olympus GX51 с цифровой системой обработки изображений при увеличениях  $\times 200$  и  $\times 500$ .

Металлофизические исследования структуры восстановленных лопаток проводили на растворе электронном микроскопе JSM 6490LV.

### **Результаты и обсуждение**

На рис. 1 приведен внешний вид рабочих лопаток ГТД из сплава типа ЖС с отработанным покрытием состава  $MeCrAlY$  в исходном состоянии. По результатам металлографических исследований толщина отработанных покрытий состава  $MeCrAlY$  на рабочих лопатках из сплава типа ЖС составляла от 40 до 50 мкм (рис. 2).

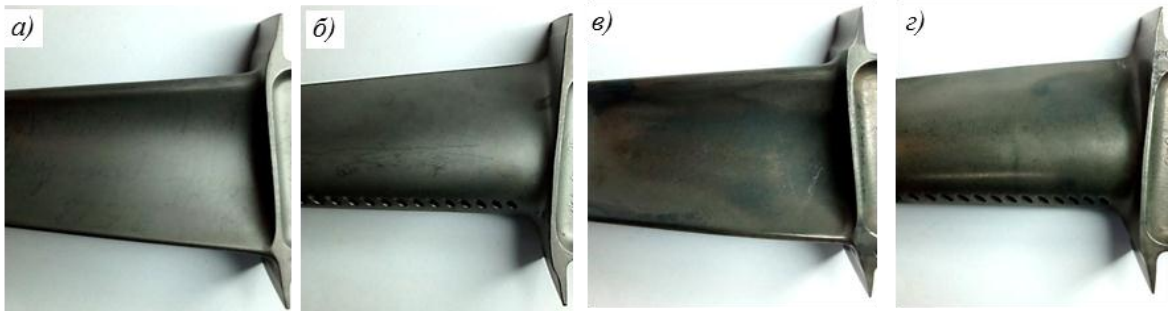


Рис. 1. Внешний вид рабочих лопаток из сплава типа ЖС серий 1 (а, б) и 2 (в, г) с отработанным покрытием состава  $MeCrAlY$  со стороны корыта (а, в) и спинки (б, г)

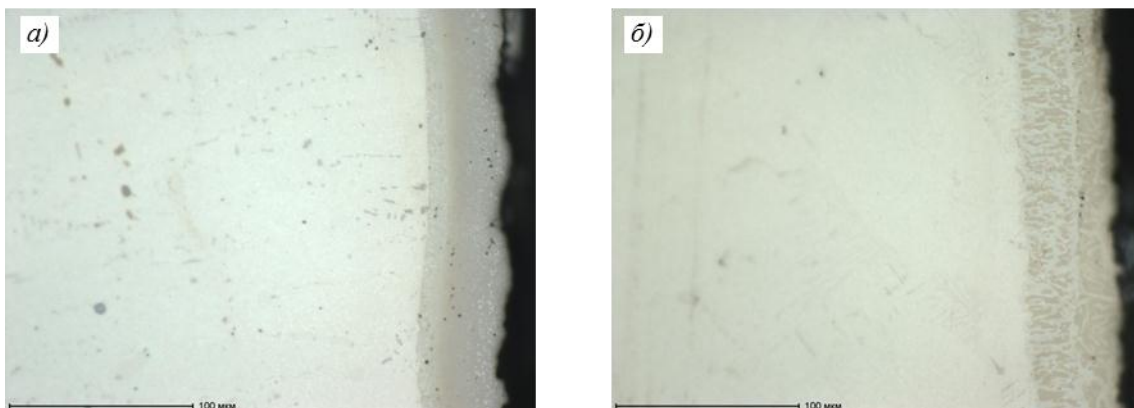


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 500$ ) рабочей лопатки из сплава типа ЖС с отработанным покрытием состава  $MeCrAlY$ , нанесенным на внешнюю поверхность со стороны корыта (а) и спинки (б)

Перед удалением отработанных покрытий состава  $MeCrAlY$  с поверхности рабочих лопаток из сплава типа ЖС проведена пескоструйная обработка внешней поверхности лопаток от нагара и продуктов газовой коррозии. Удаление отработанных покрытий состава  $MeCrAlY$  с внешней поверхности рабочих лопаток из сплава типа ЖС проведено по разработанной технологии электролитно-плазменной обработки в двухкомпонентном электролите на основе неорганической соли. Полноту удаления покрытия контролировали по проявлению макроструктуры основного материала на внешней поверхности пера лопаток и по результатам металлографических исследований.

На рис. 3 приведен внешний вид рабочих лопаток ГТД из сплава типа ЖС после электролитно-плазменного удаления отработанных покрытий состава  $MeCrAlY$  с внешней поверхности лопаток. По результатам металлографических исследований отработанные покрытия состава  $MeCrAlY$  удалены с внешней поверхности рабочих лопаток из сплава типа ЖС (рис. 4, а, б).

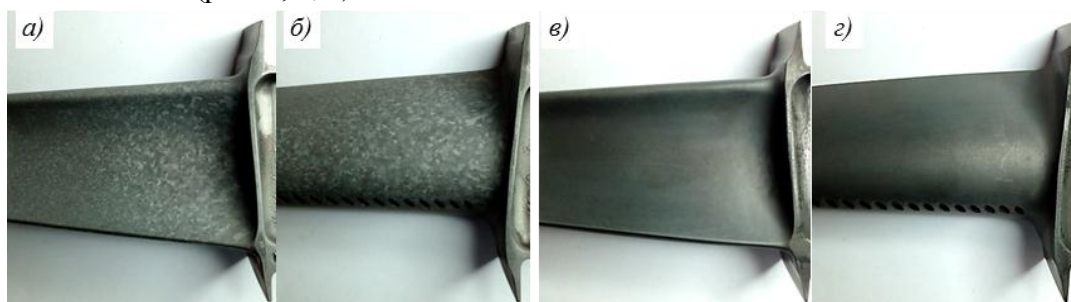


Рис. 3. Внешний вид рабочих лопаток из сплава типа ЖС с равноосной (а, б) и направленной (в, з) структурой после электролитно-плазменного удаления покрытия состава  $MeCrAlY$ , нанесенного со стороны корыта (а, в) и спинки (б, з)

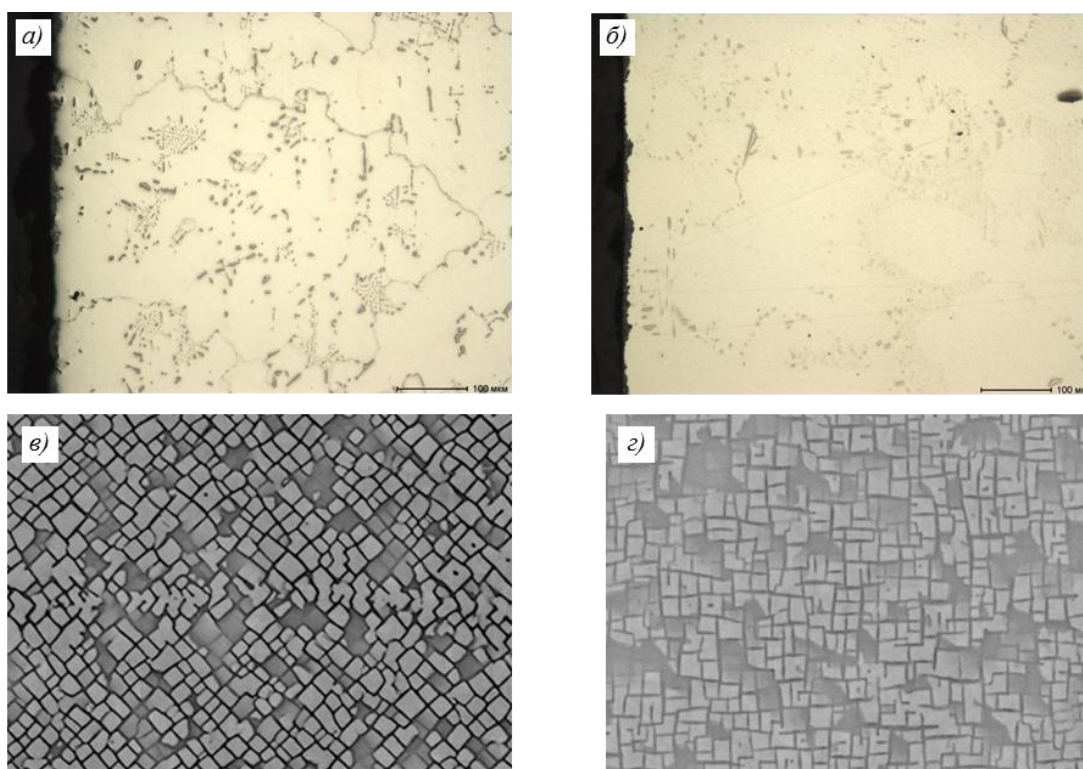


Рис. 4. Микроструктуры (а, б –  $\times 200$ ; в, з –  $\times 10000$ ) рабочих лопаток из сплава типа ЖС с равноосной (а, в) и направленной (б, з) структурой после удаления отработанных покрытий состава  $MeCrAlY$  (а, б) и после восстановления структуры (в, з)

По режимам, разработанным во ФГУП «ВИАМ», проведено горячее изостатическое прессование (ГИП) и термическая обработка рабочих лопаток из сплава типа ЖС, очищенных от отработанных покрытий состава  $MeCrAlY$ . На растровом электронном микроскопе JSM 6490LV проведен анализ микроструктуры рабочих лопаток из сплава типа ЖС после ГИП и термической обработки (рис. 4, в, з). По результатам анализа установлено, что кубическая морфология  $\gamma'$ -фазы восстановлена.

После ГИП и термической обработки рабочих лопаток ГТД из сплава типа ЖС проведен дефектоскопический контроль внешней поверхности лопаток на наличие дефектов с использованием метода капиллярного люминесцентного контроля с III классом чувствительности, обеспечивающим выявление дефектов с минимальной шириной раскрытия 10 мкм.

По результатам люминесцентного контроля установлено, что основные дефекты лопаток из сплава типа ЖС – трещины на торцевой периферической части лопаток протяженностью не более 3 мм. Трещины имели поверхностный характер, без проникновения во внутреннюю полость охлаждающих каналов. Для последующего ремонта проведена механическая обработка трещин абразивными дисковыми инструментами до полного удаления.

Внешний вид дефектов рабочих лопаток из сплава типа ЖС до и после механической зачистки приведен на рис. 5.

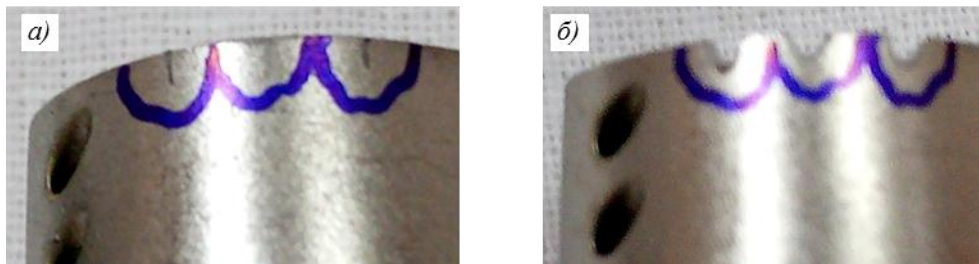


Рис. 5. Внешний вид дефектов рабочих лопаток из сплава типа ЖС до (а) и после механической зачистки (б)

После механической зачистки проведена пайка мест разделки трещин композиционными припоями разработки ФГУП «ВИАМ» и механическая обработка мест пайки абразивными дисковыми инструментами и шарошками до выравнивания поверхности.

Для контроля мест пайки на наличие дефектов после механической обработки проведен дефектоскопический контроль лопаток с использованием метода люминесцентного контроля. Результаты люминесцентного контроля показали, что в отремонтированных участках лопаток из сплава типа ЖС отсутствуют дефекты.

Внешний вид рабочих лопаток из сплава типа ЖС двух серий после механической обработки мест пайки поврежденных участков поверхности приведен на рис. 6.

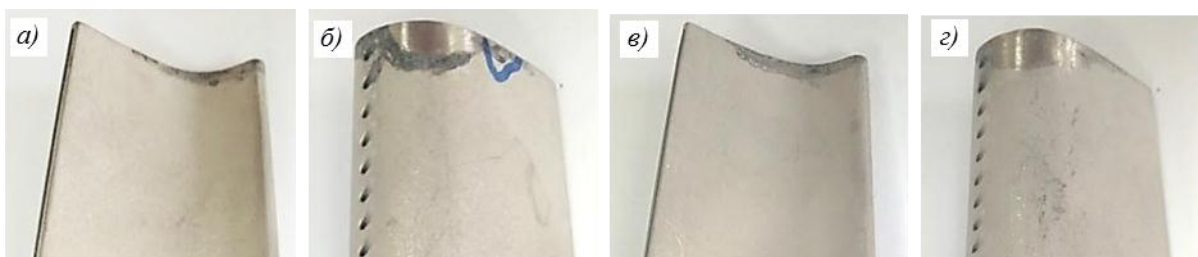


Рис. 6. Внешний вид рабочих лопаток из сплава типа ЖС серий 1 (а, б) и 2 (в, г) после механической обработки мест пайки со стороны корыта (а, в) и спинки (б, г)

На внешнюю поверхность отремонтированных рабочих лопаток ГТД из сплава типа ЖС по технологии ионно-плазменного напыления на установке МАП-3 нанесены жаростойкие покрытия состава  $\text{MeCrAlY}$  толщиной от 40 до 50 мкм. Внешний вид лопаток из сплава типа ЖС двух серий, с нанесенными покрытиями состава  $\text{MeCrAlY}$ , приведен на рис. 7.

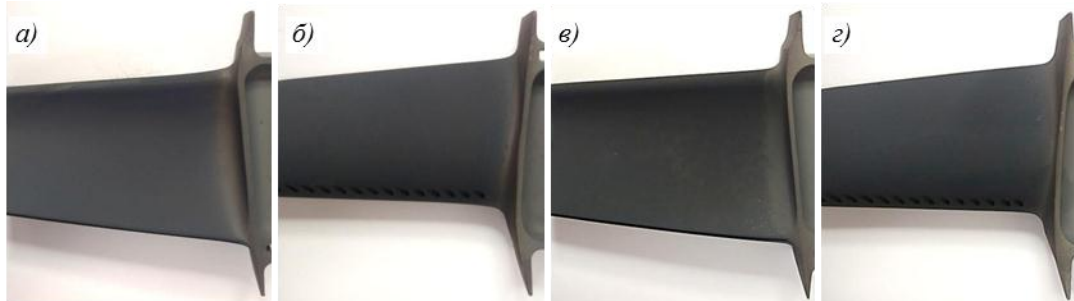


Рис. 7. Внешний вид отремонтированной рабочей лопатки из сплава типа ЖС серий 1 (а, б) и 2 (в, г) с покрытием состава  $\text{MeCrAlY}$ , нанесенным со стороны корыта (а, в) и спинки (б, г)

### Заключения

Метод электролитно-плазменного удаления дефектных и отработанных защитных покрытий с поверхности лопаток ГТД может стать альтернативной заменой традиционным методам (механическому, химическому и электрохимическому) удаления покрытий при ремонте лопаток ГТД. Основными преимуществами данного метода по сравнению с традиционными методами удаления покрытий являются возможность полной автоматизации и высокая производительность процесса, для приготовления электролитов используются малотоксичные вещества с концентрацией основного вещества в электролите не более 10% (по массе).

Показано, что данный способ может быть использован для удаления отработанных жаростойких покрытий состава  $\text{MeCrAlY}$  с поверхности рабочих лопаток ГТД из сплава типа ЖС, при этом контроль полноты удаления покрытий можно осуществлять по проявлению макроструктуры материала основы, что значительно облегчает идентификацию момента окончания процесса.

Таким образом, метод электролитно-плазменного удаления защитных покрытий может быть рекомендован для промышленного освоения предприятиями, осуществляющими ремонт ГТД.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора газотурбинных двигателей // *Электromеталлургия*. 2016. №10. С. 23–38.
2. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // *Конверсия в машиностроении*. 1999. №2. С. 42–47.
3. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток ГТД // *Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия*. М.: Наука, 2006. С. 531–608.
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. Космин 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. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Чубаров Д.А. Технология получения ионно-плазменных жаростойких подслоев с повышенным содержанием алюминия для перспективных ТЗП // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S5. С. 56–60. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-56-60.
7. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Ионно-плазменная технология: перспективные процессы, покрытия, оборудование // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 39–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-39-54.
8. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 60–70.
9. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Ягодкин Ю.Д. Перспективы применения ионно-плазменной технологии высоких энергий для межресурсного ремонта лопаток турбин // *Авиационные материалы и технологии*. 2002. №1. С. 6–13.
10. Method of removing a coating from a substrate: pat. US6905396B1; filed 20.11.03; publ. 14.07.05.
11. Process for treating the surface of a component, made from a Ni based superalloy, to be coated: pat. US6440238B1; filed 09.08.99; publ. 27.08.02.
12. Method for repairing a thermal barrier coating: pat. US6544346B1; filed 01.07.97; publ. 08.04.03.
13. Method of decoating a turbine blade: pat. US6660102B2; filed 27.12.00; publ. 17.10.02.
14. Process for applying a protective layer: pat. US7736704B2; filed 15.09.04; publ. 10.08.06.
15. Method for selectively removing coatings from metal substrates: pat. US8021491B2; filed 07.12.06; publ. 22.10.09.
16. Method for removal of surface layers of metallic coatings: pat. US6036995A; filed 31.01.97; publ. 14.03.00.
17. Method for removing aluminide coating from metal substrate and turbine engine part so treated: pat. US7270764B2; filed 09.01.03; publ. 03.11.05.
18. Method for cleaning metal parts: pat. US4324594A; filed 02.02.78; publ. 13.04.82.
19. Chemical stripping composition and method: pat. US8859479B2; filed 26.08.11; publ. 28.02.13.
20. Способ удаления жаростойкого покрытия с деталей из жаропрочных никелевых сплавов: пат. 2339738C1 Рос. Федерация; заявл. 27.03.07; опубл. 27.11.08.
21. Способ удаления покрытий с деталей из жаростойких сплавов: пат. 2200211C2 Рос. Федерация; заявл. 07.03.01; опубл. 10.03.03.
22. Способ ремонта лопаток турбины газотурбинного двигателя: пат. 2367554C2 Рос. Федерация; заявл. 08.11.07; опубл. 20.09.09.
23. Электролитно-плазменная обработка и нанесение покрытий на металлы и сплавы // *Успехи физики металлов*. 2005. Т. 6. С. 273–344.
24. Воленко А.П., Бойченко О.В., Чиркунова Н.В. Электролитно-плазменная обработка металлических изделий // *Вектор науки ТГУ*. 2012. №4 (22). 2012. С. 144–147.
25. Способ удаления покрытия с металлической подложки: пат. 2094546C1 Рос. Федерация; заявл. 03.04.95; опубл. 27.10.97.
26. Способ удаления жаростойкого металлического покрытия: пат. 2228396C1 Рос. Федерация; заявл. 19.09.02; опубл. 10.05. 04.
27. Способ удаления алюминидного покрытия на основе никеля: пат. 2211261C2 Рос. Федерация; заявл. 12.11.01; опубл. 27.08.03.
28. Способ контроля степени удаления покрытия с деталей из жаропрочных никелевых сплавов: пат. 2440878C2 Рос. Федерация; заявл. 21.04.09; опубл. 27.01.12.
29. 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.