

УДК 629.7.083

И.В. Яцюк¹, Д.А. Добрынин¹, О.Н. Доронин¹, Т.В. Павлова¹

МЕТОДЫ УДАЛЕНИЯ ЖАРОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-90-96

Приведен обзор методов удаления покрытий, широко используемых в авиационной промышленности для подготовки поверхности отработанных деталей к последующему восстановлению и ремонту. Проведен анализ основных достоинств и недостатков методов удаления покрытий. Представлены результаты применения перспективного метода электролитно-плазменной обработки.

Впервые в отечественной и зарубежной авиационной промышленности во ФГУП «ВИАМ» разработана комплексная технология ремонта отработанных лопаток турбины газотурбинного двигателя, включающая удаление покрытий методом электролитно-плазменной обработки поверхности.

Ключевые слова: удаление покрытий, электролитно-плазменная обработка, конденсационно-диффузионное покрытие, ионно-плазменное покрытие, жаростойкое покрытие, ремонт лопаток турбины.

I.V. Iatsyuk¹, D.A. Dobrynin¹, O.N. Doronin¹, T.V. Pavlova¹

METHODS FOR REMOVING HEAT RESISTANT COATINGS (review)

Provides an overview of coating removal methods widely used in the aviation industry to prepare the surface of used parts for subsequent restoration and repair. The analysis of the main advantages and disadvantages methods of removing coatings is carried out. The results of the application of the promising method of electrolyte-plasma treatment are also presented.

For the first time in the domestic and foreign aviation industry, VIAM has developed a comprehensive technology for repairing spent turbine blades, including removing coatings by electrolytic-plasma surface treatment.

Keywords: removal of coatings, electrolytic plasma treatment, condensation-diffusion coating, ion-plasma coating, heat-resistant coating, turbine blade repair.

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

Надежность газотурбинных двигателей (ГТД) существенно зависит от надежности работы лопаток турбины, являющихся деталями, которые подвергаются действию экстремальных нагрузок – динамических, статических, циклических. Кроме того, лопатки турбины подвержены газэрозионному износу, сопровождающемуся высокотемпературной газовой коррозией. Для защиты лопаток от экстремальных нагрузок, газовой коррозии и для увеличения срока эксплуатации на их поверхность наносят многофункциональные защитные покрытия [1, 2].

Как правило, отработанные лопатки подлежат утилизации. Однако на данный момент экономически целесообразным является развитие технологий ремонта отработанных лопаток турбины с обеспечением необходимого уровня характеристик поверхности деталей. Особенно важен выбор оптимального метода удаления с внешней поверхности и внутренних каналов лопаток отработанных покрытий и нагара, оставшегося после

длительной эксплуатации лопаток в условиях высокотемпературного воздействия циклических газэрозийных нагрузок. Выбранный метод удаления покрытий должен оказывать минимальное воздействие на материал-основу восстанавливаемой детали и не приводить к разрушению или изменению ее структуры.

В настоящее время в промышленности используют различные методы обработки поверхности, в том числе методы электрохимического, химического, механического удаления покрытий. Недостатками методов химического и электрохимического удаления покрытий являются высокая агрессивность используемых растворов, затраты на утилизацию отработанных растворов, а также загрязнение окружающей среды, а недостатком методов механического удаления покрытий – сложность подбора режима при обработке тонкостенных деталей. Существенный недостаток метода химического удаления покрытий – практическая невозможность достижения разных скоростей удаления покрытий на никелевой основе и жаропрочных сплавов на никелевой основе, что крайне важно при обработке сложнопрофильных лопаток ГТД, на которых покрытие расходуется неравномерно.

Наиболее перспективным методом удаления покрытий считается электролитно-плазменная обработка поверхности (ЭПОП). По сравнению с другими методами удаления покрытий метод ЭПОП обладает следующим преимуществом: за счет варьирования химического состава электролита можно регулировать селективность травления покрытия и основы, а также управлять скоростью удаления покрытия. Кроме того, данный метод является высокоэффективным процессом обработки деталей из токопроводящих материалов в нетоксичных средах, имеет высокие экологические и экономические показатели [3–5].

Во ФГУП «ВИАМ» впервые разработана комплексная технология ремонта и восстановления лопаток турбины ГТД, заключающаяся в удалении покрытий методом ЭПОП, восстановлении геометрической формы лопаток и последующем нанесении конденсационно-диффузионного ионно-плазменного защитного жаростойкого покрытия на никелевой основе с использованием вакуумно-плазменной технологии высоких энергий [1, 2, 6–8].

В данной статье представлен обзор методов удаления покрытий, используемых для восстановления и ремонта отработанных лопаток турбины ГТД, в том числе наиболее перспективного метода ЭПОП.

Методы удаления жаростойких покрытий

Метод механической обработки покрытий

Американские и европейские компании прочно удерживают лидерство среди разработчиков эффективных способов удаления жаростойких покрытий после наработки. В их числе – американская компания Huffman Corporation, которая практикует применение гидроабразивной обработки для удаления дефектных покрытий с поверхности деталей струей воды с давлением от 34 до 374,3 МПа [9]. Конкуренцию ей составляет швейцарская корпорация Alstom Technology Ltd, которая предлагает воспользоваться двухстадийным способом снятия жаростойких покрытий. Сначала дефектные слои покрытия подвергают химической обработке с применением фторсодержащих веществ – это может быть фторид аммония, плавиковая кислота или политетрафторэтиленовая смола. Вторая стадия обработки предполагает удаление продуктов химических реакций с использованием гидроабразивной технологии [10, 11]. Аналогичный метод, который отличается лишь последовательностью выполнения операций, рекомендован немецкой компанией Siemens Aktiengesellschaft. В соответствии с рекомендациями разработчика

в процессе гидроабразивной обработки необходимо удалить от 75 до 95% общей толщины покрытия, а после этого приступить к химическому удалению остатков покрытия. Эффективная очистка поверхности обеспечивается за счет использования концентрированного раствора соляной кислоты [12]. Немецкая корпорация Man Turbo AG рекомендует проводить обработку в три стадии, начиная с предварительного газового алитирования. При газовом алитировании внешний слой разрыхляется и лучше поддается последующему удалению с поверхности при помощи пескоструйной обработки. Затем оставшийся внутренний диффузионный слой снимают посредством абразивной и шлифовальной обработки [13]. Практически идентичные технологии предлагают американская корпорация General Electric [14] и ирландская компания Sermatech International Inc. [15].

При всей популярности методов механического снятия жаростойких покрытий, используемых при выполнении ремонтных операций с лопатками ГТД, они обладают следующими недостатками: повышенная трудоемкость выполнения процедур, существенные финансовые и временные затраты, изменение первоначальных физико-механических свойств материала-основы в результате образования наклепа.

В России технологии механического снятия защитных покрытий с поверхности деталей получили незначительное распространение по сравнению с методами электро-механической и химической обработки.

Методы химической и электрохимической обработки поверхности

Методы химического удаления защитных покрытий с поверхности деталей вызывают повышенный интерес у специалистов современного производства. В большинстве случаев применяют растворы на основе фосфорной, серной и азотной кислот. Так, инженеры компании General Electric рекомендуют использовать для очистки поверхности от дефектных жаростойких покрытий холодные концентрированные растворы соляной, азотной, фторсодержащих или фосфорной кислот, в которых процентное содержание кислоты достигает 80% [16].

Представители американской корпорации Dayton Process B.V. рекомендуют оригинальную технологию фторуглеродистой очистки. Данный метод предполагает, что в ходе обработки образуется фтористый водород, который выполняет функцию травящего агента [17]. В свою очередь специалисты американской корпорации United Technologies Corporation для снятия жаростойких покрытий рекомендуют растворы серной, фосфорной, соляной, плавиковой кислот с добавкой ингибиторов травления. Функцию последних успешно выполняют соединения трехвалентного железа (Fe^{3+}) [18].

Сотрудники Уфимского государственного авиационного технического университета представили собственное решение, которое позволяет эффективно снимать жаростойкие покрытия в растворах, приготовленных на основе азотной и соляной кислот, а также ингибиторов травления. Обработку проводили при комнатной температуре [19]. Российское акционерное общество «НПЦ газотурбостроения «Салют» представило собственную разработку. Для удаления покрытий применяли эффективные растворы на основе азотной и плавиковой кислот с добавками оксида хрома и порошка железа, выполняющих функцию ингибиторов травления [20]. Специалистами предприятия также разработан метод удаления остатков покрытия после химической обработки с применением расплава бифторида калия [21].

Методы химического удаления жаростойких покрытий получили широкое распространение не только в России, но и за ее пределами. Такие методы, к сожалению, не лишены недостатков, наиболее значимыми среди которых являются: незначительный

эксплуатационный потенциал растворов, приводящий к существенным финансовым издержкам предприятий; повышенная коррозионная активность и токсичность химической среды; взрыво- и пожароопасность ингредиентов растворов. Персонал вынужден использовать специализированные средства защиты. Кроме того, требуются организация работы очистных систем и регулярное отслеживание их функционирования. В ходе химического снятия защитного покрытия возможно наводороживание материала-основы, приводящее к снижению его длительной и циклической прочности.

Особенность метода электрохимической обработки деталей заключается в том, что защитное покрытие подвергается анодному растворению в электролите. Функцию электролита в большинстве случаев выполняют растворы на основе неорганических кислот. К детали подается напряжение на уровне 20 В.

По сравнению с методами химической и механической очистки поверхности от защитных покрытий технология электрохимического удаления считается наименее трудоемкой. Помимо этого, в результате обработки не изменяются физико-механические свойства материала-основы, а после обработки таким способом поверхность имеет более высокие коррозионную стойкость и механические свойства. Метод электрохимической обработки имеет и определенные недостатки, среди которых высокая энергоемкость процесса и необходимость дополнительной антикоррозионной защиты металлических поверхностей оборудования. Перед выполнением работ специалисты вынуждены принимать меры по обеспечению взрыво- и пожаробезопасности, так как в результате химических реакций выделяются взрывоопасные и горючие вещества.

Метод электролитно-плазменной обработки поверхности

В настоящее время специалисты активно занимаются исследованиями, ориентированными на создание уникальной технологии удаления защитных покрытий электролитно-плазменным способом. Эта технология является усовершенствованным вариантом электрохимической обработки. В качестве электролита используют нетоксичные растворы, приготовленные на основе неорганических солей. Содержание основного компонента электролита – не более 10%. Обработку проводят под действием импульсного или постоянного напряжения (200–400 В), определенное значение которого выбирают в зависимости от марки материала. Если обрабатываемая деталь, погруженная в электролит, подвергается воздействию высокого напряжения, то на ее поверхности происходит формирование парогазового слоя, который выполняет функцию границы раздела между поверхностью самой детали и электролитом. Парогазовый слой имеет толщину ~50 мкм, поэтому воздействие высокого напряжения приводит к образованию импульсных микрозарядов на микровыступах поверхности. Под воздействием микрозарядов происходят оплавление и разрушение защитного покрытия [22]. Электролитно-плазменная обработка характеризуется различным уровнем стабильности, во многом определяющей монолитностью и устойчивостью образованного парогазового слоя. Данные качества в свою очередь зависят от молекулярных свойств электролита, гидродинамических показателей электролита, тепловых факторов и прочих параметров.

Технология электролитно-плазменной обработки активно используется при подготовке поверхности к дальнейшему нанесению покрытия. В процессе обработки удается вдвое снизить показатели шероховатости поверхности и придать материалу желаемый блеск. По сравнению с альтернативными способами электролитно-плазменная обработка имеет определенные достоинства, среди которых можно выделить повышенную производительность, а также отсутствие признаков изменения структурного слоя материала, подвергаемого обработке. Кроме того, после обработки можно повторно наносить покрытие без предварительного обезжиривания поверхности.

Сотрудники Уфимского государственного авиационного технического университета представили ряд собственных разработок – технологии электролитно-плазменной очистки поверхности деталей от дефектных покрытий в электролитах, приготовленных из солей аммония, при температуре до 90 °С. В процессе обработки поверхности на деталь подается напряжение до 340 В [23].

В работе [24] представлено описание технологии электролитно-плазменной обработки материалов в электролитах, приготовленных на основе неорганических солей. Разработчиками выполнена обработка поверхности стальных деталей с целью очистки от окислов и продуктов коррозии. На практике удалось выяснить, что в течение 4 мин подобной обработки происходит полная очистка поверхности деталей от имеющихся загрязнений.

Уфимское предприятие ООО «НПП «Уралспецтехнология» рекомендует контролировать эффективность очистки поверхности от жаростойких покрытий посредством электролитно-плазменной обработки деталей в электролитах, приготовленных на основе солей аммония, нагретых до температуры 75–85 °С. На деталь подается рабочее напряжение, не превышающее 300 В [25]. О полной очистке от покрытия можно судить по проявлению макроструктуры материала основы.

Во ФГУП «ВИАМ» предложены способы очистки поверхности деталей от жаростойких покрытий системы Me–Cr–Al–Y методом электролитно-плазменной обработки в электролитах на основе неорганических кислот с массовой долей по основному веществу до 12% и при рабочем напряжении до 380 В [26, 27]. Разработано также математическое моделирование процессов электролитно-плазменной очистки поверхности от жаростойких покрытий. Постановка эксперимента позволяет варьировать большое число исследуемых параметров и проводить оптимизацию технологических режимов удаления покрытий. Задачей математического моделирования процесса ЭПОП является определение влияния основных технологических параметров процесса (напряжения, концентрации компонентов и температуры электролита) на скорость удаления конденсационно-диффузионных покрытий.

Таким образом, метод электролитно-плазменной обработки может стать альтернативным традиционным методам обработки (трудоемкому методу механической обработки и токсичным, пожаро- и взрывоопасным методам химической и электрохимической обработки). Основными недостатками данного метода являются невозможность обработки внутренних полостей, отверстий и углублений деталей небольших размеров, высокая энергоемкость процесса и необходимость использования специализированного дорогостоящего оборудования при обработке крупногабаритных деталей.

Однако в настоящее время ни один из известных методов очистки поверхности от покрытий полностью не решает проблему обработки тонкостенных сложнопрофильных деталей с внутренними полостями.

Заключения

Представлен обзор наиболее распространенных методов удаления покрытий, широко применяемых в отечественной и зарубежной авиационной промышленности в технологиях восстановления и ремонта лопаток турбины ГТД после наработки. Проведен анализ основных достоинств и недостатков наиболее распространенных методов очистки поверхности от покрытий – механического, химического и электрохимического.

Основными недостатками традиционных методов удаления покрытий (механического, химического и электрохимического) являются высокая трудоемкость, большие затраты расходуемых материалов и высокие временные затраты, возможные повреждения геометрической формы обрабатываемого изделия и внедрение частичек абразивного

материала в основу (механические методы), необходимость проведения постоянного экологического контроля и обеспечения пожарной безопасности (химические и электрохимические методы) и др.

Широкое внедрение в производство методов электролитно-плазменной обработки поверхности позволит со временем заменить токсичные химические и электрохимические методы обработки, а также трудоемкие методы механической обработки. Процесс электролитно-плазменной обработки металлов и сплавов является экологически чистым и удовлетворяет санитарным нормам – для очистки отработанного электролита не требуются специальные очистные сооружения.

Во ФГУП «ВИАМ» впервые разработана и успешно опробована комплексная технология восстановления лопаток турбины из жаропрочных никелевых сплавов после наработки, включающая метод ЭПОП для удаления покрытий и подготовки поверхности под их повторное нанесение.

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. №S. С. 60–70.
2. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Защитные покрытия лопаток турбин перспективных ГТД // *Газотурбинные технологии*. 2001. №2 (12). 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: электрон. науч.-техн. журн*. 2016. №2 (38). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-4-4.
4. Попова С.В., Добрынин Д.А., Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Удаление жаростойких конденсационно-диффузионных покрытий с поверхности лопаток ГТД до и после наработки // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2017. №1 (49). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-4-4.
5. Добрынин Д.А., Павлова Т.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Алексеева М.С. Использование электролитно-плазменной обработки для ремонта лопаток ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2019. №8 (80). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-18-26.
6. 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.
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. Мубояджян С.А., Каблов Е.Н., Будиновский С.А. Вакуумно-плазменная технология получения защитных покрытий из сложнолегированных сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1995. №2. С. 15–18.
9. Method of removing a coating from a substrate: pat. US6905396B1; filed 20.11.03; publ. 14.07.05.
10. 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.
11. Method for repairing a thermal barrier coating: pat. US6544346B1; filed 01.07.97; publ. 08.04.03.
12. Method of decoating a turbine blade: pat. US6660102B2; filed 27.12.00; publ. 17.10.02.
13. Process for applying a protective layer: pat. US7736704B2; filed 15.09.04; publ. 10.08.06.
14. Method for selectively removing coatings from metal substrates: pat. US8021491B2; filed 07.12.06; publ. 22.10.09.
15. Method for removal of surface layers of metallic coatings: pat. US6036995A; filed 31.01.97; publ. 14.03.00.
16. Method for removing aluminide coating from metal substrate and turbine engine part so treated: pat. US7270764B2; filed 09.01.03; publ. 03.11.05.

17. Method for cleaning metal parts: pat. US4324594A; filed 02.02.78; publ. 13.04.82.
18. Chemical stripping composition and method: pat. US8859479B2; filed 26.08.11; publ. 28.02.13.
19. Способ удаления жаростойкого покрытия с деталей из жаропрочных никелевых сплавов: пат. 2339738С1 Рос. Федерация; заявл. 27.03.07; опубл. 27.11.08.
20. Способ удаления покрытий с деталей из жаростойких сплавов: пат. 2200211С2 Рос. Федерация; заявл. 07.03.01; опубл. 10.03.03.
21. Способ ремонта лопаток турбины газотурбинного двигателя: пат. 2367554С2 Рос. Федерация; заявл. 08.11.07; опубл. 20.09.09.
22. Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н., Бойко А.Г., Жадкевич М.Л., Калышканов М.К., Рузимов Ш.М. Электролитно-плазменная обработка и нанесение покрытий на металлы и сплавы // Успехи физики металлов. 2005. Т. 6. №4. С. 273–344.
23. Способ удаления покрытия с металлической подложки: пат. 2094546С1 Рос. Федерация; заявл. 03.04.95; опубл. 27.10.97.
24. Куликов И.С., Вашенко С.В., Каменев А.Я. Электролитно-плазменная обработка материалов. Минск: Белорусская наука, 2010. 232 с.
25. Способ контроля степени удаления покрытия с деталей из жаропрочных никелевых сплавов: пат. 2440878С2 Рос. Федерация; заявл. 21.04.09; опубл. 27.01.12.
26. Способ удаления жаростойкого металлического покрытия: пат. 2228396С1 Рос. Федерация; заявл. 19.09.02; опубл. 10.05.04.
27. Способ удаления алюминидного покрытия на основе никеля: пат. 2211261С2 Рос. Федерация; заявл. 12.11.01; опубл. 27.08.03.