

УДК 621.9.044

С.В. Попова¹, Д.А. Добрынин¹, С.А. Мубояджян¹, С.А. Будиновский¹

УДАЛЕНИЕ ЖАРОСТОЙКИХ КОНДЕНСАЦИОННО-ДИФфуЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ С ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК ГТД ДО И ПОСЛЕ НАРАБОТКИ

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-4-4

Важным звеном технологии ремонта лопаток турбины ГТД является удаление отработанных покрытий с поверхности лопатки сложного профиля. Разработан способ удаления жаростойких конденсационно-диффузионных покрытий в электролитной плазме направленной струей электролита, который позволяет осуществлять равномерное послойное удаление жаростойкого покрытия с подложки из жаропрочного никелевого сплава. Особенностью процесса является универсальность используемых электролитов, не требующих корректировки по составу при удалении жаростойких конденсационно-диффузионных покрытий различной степени легирования.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.11. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие прогрессивные технологии механической обработки металлических и неметаллических материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: электролитно-плазменная обработка, травление, жаростойкое покрытие, лопатка турбины, электролит, жаропрочный никелевый сплав, конденсационно-диффузионное покрытие, поверхность.

The significant part of the blade repair technology is removing used coatings from the surface of complex geometry blade. A method has been developed for removal of heat resisting condensation and diffusion coatings in electrolytic plasma by directional jet of electrolyte. This method allows uniform layer-by-layer removing heat resistant coatings from heat-resistant nickel alloys. The peculiarity of the process is a universality of usable electrolytes not requiring component correction in dependence on heat-resistant coating and alloy composition.

The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 10.11. «Power-efficient, resource-saving progressive technologies of machining of metal and non-metallic materials» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: electrolytic-plasma treating, stripping, heat-resistant coating, blade, heat-resistant nickel alloy, condensation-diffusion coating, surface.

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

Экономичность и надежность работы турбины ГТД определяется состоянием рабочих лопаток турбины. Согласно статистическим данным, отказ ГТД в результате поломки связан с повреждениями, ~50% из которых приходится на долю рабочих лопаток. В результате длительной наработки при высоких температурах на поверхности лопаток возникают различного рода дефекты: эрозионно-коррозионные повреждения, выбоины, трещины и т. д. Кроме того, сплав лопаток турбины ГТД претерпевает струк-

турные превращения, выражающиеся, как правило, в коагуляции и изменении морфологии упрочняющей γ' -фазы и карбидов в теле и по границам зерен. Дальнейшая эксплуатация лопаток, имеющих подобные повреждения, невозможна. Для продления срока службы лопаток используют различные схемы ремонта, которые определяются степенью повреждения лопатки. Обязательным этапом любой ремонтной технологии лопаток турбины ГТД является удаление поврежденного покрытия.

Применяемые на моторостроительных предприятиях авиационно-промышленного комплекса России технологии удаления дефектных покрытий с поверхности деталей ГТД в условиях серийного производства (электрохимическая обработка в расплаве бифторида калия, химическое травление с использованием растворов, содержащих плавиковую кислоту) приводят к травлению основного металла и не позволяют в полной мере подготовить поверхность деталей для последующего ремонта методами пайки, сварки, наплавки с последующим нанесением защитных диффузионных или конденсационно-диффузионных покрытий. Кроме того, плавиковая кислота обладает высокой токсичностью, агрессивностью и сложностью утилизации. Для каждого состава жаростойкого покрытия необходимо производить корректировку состава раствора. С целью снижения нагрузки на производство и повышения его экологичности, для различных жаростойких конденсационно-диффузионных покрытий необходимо разработать эффективные составы раствора универсального применения.

Кроме того, при эксплуатации лопаток ТВД вследствие протекания процессов высокотемпературной сульфидно-оксидной коррозии происходит потеря работоспособности защитного алюминидного покрытия. В некоторых случаях, когда внутренний подслоя алюминидного покрытия не имеет дефектов и трещин, актуальной проблемой в технологии ремонта является удаление только внешнего подслоя алюминидного покрытия [2, 3]. При использовании химических и электрохимических методов удаления покрытий происходит травление покрытия вместе с основой [4, 5]. Для снижения агрессивного воздействия реактива на основу и нижележащий подслоя в раствор добавляют бихромат калия (или хромовый ангидрид), который требует специальных методов утилизации [4].

Кроме того, лопатки представляют собой изделия сложной геометрической формы, к которым предъявляются высокие требования по допустимому изменению геометрических размеров (малые припуски), поэтому удаление покрытий с лопаток с использованием химических и в особенности электрохимических процессов представляет большую проблему ввиду растворения основного материала по острым кромкам и другим выступающим элементам лопатки.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали образцы из сплава ВКНА-1В с покрытиями СДП-41+ВСДП-16 и СДП-4+ВСДП-16, сплава ВКНА-25 с покрытиями СДП-41+ВСДП-16 и СДП-4+ВСДП-16, а также лопатки из сплава ЖС26 с серийным покрытием ВСДП-3+ВСДП-16. Составы сплавов представлены в таблице. Элементный состав сплавов, используемых для изготовления покрытий и образцов, на которые наносили покрытия, определяли с помощью портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра.

Все покрытия, исследованные в работе, получены на промышленной ионно-плазменной установке МАП-2 по серийной технологии. Окончательное формирование многослойных ионно-плазменных покрытий, представленных в таблице, происходило в процессе вакуумной термообработки при температуре 1050°C и продолжительности выдержки 3 ч [6–8].

Для удаления использовали как покрытия без наработки, так и с наработкой на изделиях, которая осуществлялась путем выдержки изделий с покрытиями в печи в течение 30 ч при температуре выше 1100°C.

Удаление конденсационно-диффузионных ионно-плазменных покрытий производили с помощью электролитно-плазменного метода, используя способ направленной струи электролита на обрабатываемое изделие, и путем погружения обрабатываемого изделия в электролит с последующим формированием паро-плазменной оболочки вокруг обрабатываемой поверхности [9, 10].

При реализации способа направленной струи осуществлялась анодная поляризация обрабатываемого изделия, катодом являлась трубка из нержавеющей стали, по которой происходила подача электролита на обрабатываемое изделие. Расстояние между катодом и анодом поддерживалось с помощью фторопластового упора на трубке и составило 3 мм.

Состав интерметаллидных сплавов и сплавов для нанесения покрытий

Сплав	Содержание легирующих элементов (средние значения), % (по массе)												
	Ni	Al	Cr	Mo	W	Co	Ti	Re	Ta	Y	Nb	V	Hf
ВКНА-1В	Основа	8,5	5,5	3,5	3	–	1,1	–	–	–	–	–	–
ВКНА-25	То же	8,3	5,8	5	3	4,5	0,5	1,4	–	–	–	–	–
ЖС26	-«-	5,9	5,0	1,1	11,7	9,0	1,0	–	–	–	1,6	1,0	–
ВСДП-16	15	Основа	–	–	–	–	–	–	–	1,5	–	–	–
ВСДП-3	Основа	11,2	19	–	–	–	–	0,6	–	0,4	–	–	0,8
ВСДП-4	То же	12	6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,8
СДП-41	-«-	12	10	–	–	–	–	0,6	3	0,5	–	–	0,8

При реализации второго способа (удаление конденсационно-диффузионных ионно-плазменных покрытий путем погружения обрабатываемого изделия в электролит) катодом является обрабатываемое изделие, анодом – нихромовые пластины площадью, превышающей в 6 раз площадь поверхности обрабатываемого изделия.

Для удаления конденсационно-диффузионных покрытий с поверхности изделий из жаропрочных никелевых сплавов использовали водные растворы фтористого аммония и калия, а также щелочи. Выбор концентрации электролитов осуществлялся экспериментально с дальнейшим расчетным подтверждением их оптимальной концентрации из условия стабилизации пленочного кипения электролита [11]. Концентрация всех используемых водных растворов не превышает 3% (по массе). Оптимальная концентрация электролита определяется устойчивостью паро-плазменного слоя, качеством обработки поверхности (селективное, послойное удаление покрытия) и скоростью удаления покрытия. При увеличении концентрации нейтральных растворов (фтористого калия и аммония) скорость удаления покрытий увеличивается, однако также увеличивается агрессивность электролита к нижележащему подслою удаляемого покрытия или к подложке. При увеличении концентрации щелочи в растворе выше оптимального значения скорость удаления покрытия не изменяется. Таким образом, повышение концентрации щелочи нецелесообразно.

По окончании обработки проводили визуальный контроль поверхности обрабатываемых изделий с помощью микроскопа МБС-1 при семикратном увеличении для оценки качества электролитно-плазменной обработки поверхности: наличие пор, питтингов, неровности поверхности после обработки.

Полноту удаления покрытия контролировали с помощью гравиметрического метода с использованием аналитических весов Sartorius, а также по изменению величины тока в цепи гальванического элемента относительно контрольного образца (или лопатки) из соответствующего сплава без покрытия в подкисленном растворе сульфата никеля.

Показания тока отслеживали с помощью портативного мультиметра Defort DMM-100N, позволяющего проводить измерение величины постоянного тока в цепи в диапазоне от 2 мА до 20 А.

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Olympus GX51 с системой анализа изображений SIAMS ($\times 500$).

Результаты

Жаростойкое конденсационно-диффузионное покрытие без наработки состоит из двух зон: верхний слой покрытия, состоящий из β -фазы, обогащенной алюминием, который по мере эксплуатации изделия окисляется с образованием тонкого слоя оксида алюминия; внутренний слой – из (γ/γ') -фазы. По мере наработки покрытия на изделии, толщина оксидного слоя увеличивается. Ввиду высоких внутренних напряжений слой оксида алюминия растрескивается и отслаивается. Истощение β -фазы по алюминию приводит к диффузии никеля из никелевого сплава в покрытие, в то время как жаростойкие элементы диффундируют из покрытия в подложку – происходит формирование диффузионного слоя с образованием ТПУ и γ' -фаз (рис. 1) [12, 13].

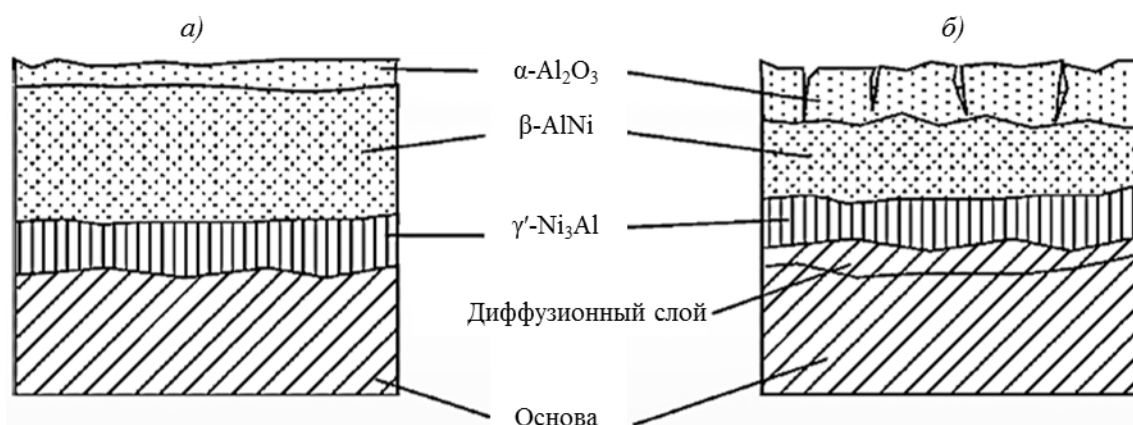


Рис. 1. Развитие повреждения жаростойкого покрытия:
а – исходное покрытие; б – после наработки

Установлено, что электролитно-плазменная обработка путем погружения обрабатываемого изделия в электролит имеет ограничение по габаритам и геометрической форме обрабатываемого изделия. Это объясняется устойчивостью паро-плазменной оболочки только в условиях пленочного кипения электролита вокруг обрабатываемого изделия. При электролитно-плазменной обработке способом направленной струи плазменный слой образуется только в локальной области между вытекающим из трубки электролитом и поверхностью обрабатываемого изделия. Реализация плавного движения трубки с электролитом вдоль поверхности обрабатываемого изделия при струйной электролитно-плазменной обработке позволяет удалять покрытия с изделий различных габаритов и геометрической формы.

Скорость удаления покрытий в электролитной плазме определяется степенью ионизации плазмы, которая зависит от разности температур между поверхностью обрабатываемого изделия и электролитом при его кипении (тепловой нагрузкой), а также составом электролита [14, 15]. Чем выше разность между температурами обрабатываемого изделия и кипения электролита, тем меньше толщина образующейся паровой пленки при пленочном кипении, соответственно напряженность поля в паровом слое выше и, следовательно, выше степень ионизации плазмы. При малой разности темпера-

тур наблюдается пузырьковое кипение, которое при повышенных напряжениях является причиной коммутационных явлений в приэлектродной области.

Для перехода пузырькового режима кипения в пленочное необходимо, чтобы тепловая нагрузка на нагреваемой поверхности превышала некоторую критическую величину ($q_{кр}$). Однако при электролитно-плазменной обработке, характеризуемой рядом взаимосвязанных явлений, тепловую нагрузку можно увеличить только до некоторой величины, которая может и не достигнуть критической. Ограничение по тепловой нагрузке связано с возможностью попадания с ростом напряжения в область гидродинамического режима, когда турбулентные вихри срывают паровую пленку [11, 15].

Согласно гидродинамической и тепловой теориям кризиса кипения [11, 14, 15], величина критического теплового потока, при котором пузырьковое кипение в насыщенной жидкости переходит в пленочное кипение, определяется величинами коэффициента поверхностного натяжения жидкости и коэффициента теплопроводности жидкости, значениями краевого угла смачивания и вязкости электролита. Значения теплопроводности и краевого угла смачивания уменьшаются с увеличением концентрации электролита, а другие показатели растут. Для изменения вышеуказанных параметров в раствор вводят добавки различных компонентов: ПАВ, комплексообразователи и другие [9, 11].

Скорость удаления жаростойкого покрытия с поверхности изделия при прочих равных условиях (состав электролита, его температура, природа обрабатываемой поверхности) выше при струйной обработке в $\sim 2-4$ раза в зависимости от площади обрабатываемого изделия, чем при погружении обрабатываемого изделия в раствор электролита. Удаление покрытия ВСДП-16 путем погружения изделия площадью 20 см^2 в раствор осуществляется в течение 40 мин, в то время как при струйной обработке при прочих равных условиях удаление этого покрытия осуществляется за 10–15 мин.

Далее приводятся результаты исследования удаления жаростойкого покрытия с поверхности изделия только при струйной обработке.

Для удаления покрытий использовали растворы следующих составов: NH_4F ; NH_4F +трилон Б (динатриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА^{2-})); KF ; KF +трилон Б; KOH ; KOH +трилон Б. Концентрацию растворов варьировали в пределах 2–3% (по массе). Трилон Б образует устойчивые комплексные соединения с большинством металлов, в том числе с никелем, алюминием, хромом и другими элементами, которые входят в состав покрытия, и ускоряет процесс его удаления. Трилон Б также вступает в реакцию со многими сильными окислителями и предотвращает воздействие электролита на основу, поэтому количество добавляемого комплексообразователя ограничено его интенсивным пассивирующим действием при избыточном содержании. Для эффективного удаления покрытия количество трилона Б в растворе составило 0,15–0,20% (по массе). Установлено, что скорость удаления жаростойких покрытий с поверхности изделий из жаропрочных никелевых сплавов в присутствии трилона Б увеличивается на $\sim 30-50\%$ при достижении равномерности обработки.

Использование фтористого аммония в качестве реактива для травления даже в присутствии трилона Б приводит к травлению основы с образованием питтингов. В растворе щелочи (2,5%-ный водный раствор KOH) происходит равномерное послойное удаление покрытия в режиме полирования при минимальном воздействии на основу. Однако продолжительность обработки увеличивается на 50–100% относительно обработки в растворе фтористого калия. При струйной обработке катод (трубка) и анод (обрабатываемое изделие) находятся на расстоянии 3–5 мм, поэтому пароплазменный слой имеет в своем составе как продукты окисления, так и продукты восстановления. Согласно имеющимся представлениям о физико-химических процессах, происходящих в плазме электролита [11, 14, 15], примерный состав пароплазменного слоя в растворе

электролита состава NH_4F +трилон Б следующий: CO_2 , NH_3 , O_2 , $(\text{O})^0$, N_2 , F_2 , $(\text{F})^0$, H_2 , $(\text{H})^0$, H_2O , F^- , ЭДТА^{2-} , HF . Наличие плавиковой кислоты и аммиака в пароплазменном слое обусловлено гидролизом фтористого аммония в растворе по катиону и аниону. Состав пароплазменного слоя в растворе KOH : K^+ , OH^- , H_2O , O_2 , $(\text{O})^0$, H_2 , $(\text{H})^0$. Состав пароплазменного слоя в растворе KF : K^+ , F^- , $(\text{F})^0$, HF , OH^- , H_2O , $(\text{O})^0$, H_2 , $(\text{H})^0$. Фтористый калий также подвергается гидролизу с образованием плавиковой кислоты и щелочи. В процессе удаления покрытий участвуют частицы-окислители: O_2 , $(\text{O})^0$, F_2 , $(\text{F})^0$, F^- , ЭДТА^{2-} , H_2 , $(\text{H})^0$, OH^- , H^+ , HF . В плазме протекают два конкурирующих процесса: пассивирование кислородом, гидроксид-ионами и травление плавиковой кислотой, фтором, водородом. Наличие гидроксид-ионов в плазме раствора фтористого калия уменьшает интенсивность травления поверхности основы плавиковой кислотой. На скорость удаления покрытия влияет концентрация активных частиц в плазме: чем выше концентрация активных частиц в плазме, тем интенсивнее идет процесс удаления покрытий. Концентрация активных частиц в плазме определяется природой электролита и его концентрацией. Установлено, что для снижения интенсивности процесса травления по сравнению с процессом пассивирования следует увеличивать температуру электролита, тогда возрастает концентрация паров воды в составе плазмы и кислорода. Так, повышение температуры фтористого аммония с 20 до 70°C при струйной обработке приводит к равномерному удалению покрытия без травления основы.

Результаты электролитно-плазменной струйной обработки образцов из сплава ВКНА-1В с жаростойкими покрытиями в растворе KF +трилон Б представлены на рис. 2.

На образцах после наработки заметно формирование диффузионной зоны с выделением γ' -фазы в виде пластин (рисунок 2, а–з). Удаление покрытий с образцов с наработкой происходит медленнее, чем с образцов без наработки. Продолжительность удаления как покрытия СДП-41+ВСДП-16, так и покрытия СДП-4+ВСДП-16, увеличилась на 30 мин для образцов с наработкой по сравнению с образцами без наработки. Скорость удаления покрытий СДП-41+ВСДП-16 и СДП-4+ВСДП-16 одинакова независимо от сплава-основы (ВКНА-1В и ВКНА-25).

Установлено, что скорость удаления комплексного покрытия изменяется в зависимости от толщины каждого слоя. Внешний слой толщиной ~30 мкм, обогащенный алюминием, удаляется в течение первых 10–15 мин обработки. Внутренний слой толщиной ~60 мкм, представляющий собой (γ/γ')-фазу, удаляется за 40–60 мин при площади обрабатываемой поверхности 20 см².

При удалении покрытия в растворе фтористого калия с образцов без наработки по мере приближения к сплаву-основе происходит его травление с проявлением макроструктуры, для образцов с наработанным покрытием – преимущественное растворение γ' -фазы диффузионной зоны (рис. 2, з). Неравномерное растворение основы нежелательно для ответственных деталей турбины, поэтому целесообразно осуществить замену электролита при финишном удалении покрытия. В качестве второго электролита для удаления двухслойного конденсационно-диффузионного покрытия использовали раствор щелочи (KOH) с добавкой трилона Б. Степень удаления покрытия контролировалась по току гальванического элемента. При приближении значения тока на табло гальванометра к нулевому следует произвести замену электролита и продолжить процесс обработки в растворе щелочи.

Опробование электролитно-плазменной струйной обработки в двух электролитах осуществляли на лопатках турбины ГТД из сплава ЖС26 с серийным покрытием СДП-3+ВСДП-16. Результаты обработки лопаток турбины ГТД в растворе KF +трилон Б с последующей финишной обработкой в растворе KOH +трилон Б представлены на рис. 3.

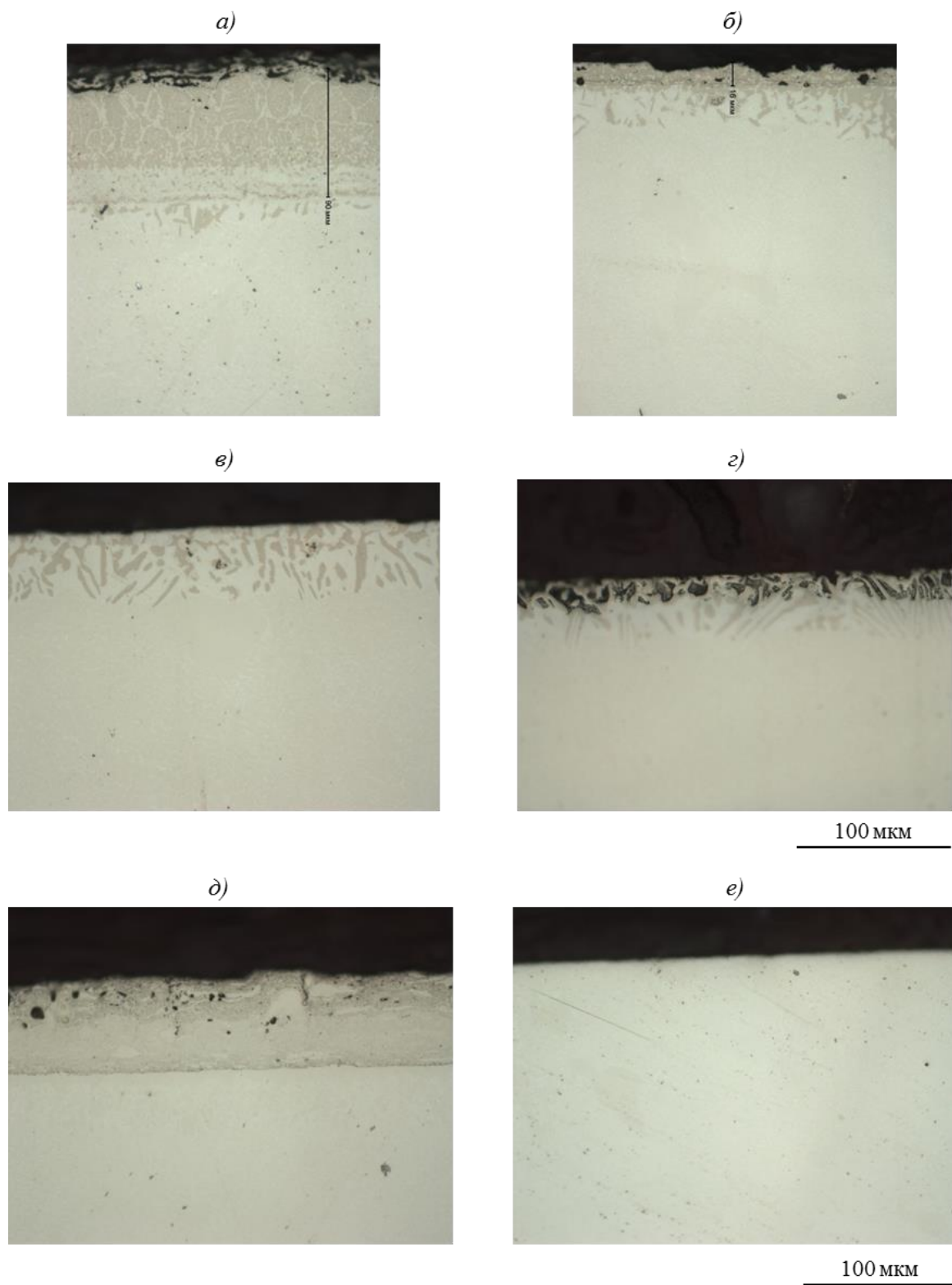


Рис. 2. Результаты удаления покрытия СДП-41+ВСДП-16 с образцов из сплава ВКНА-1В после наработки в течение 30 ч (а-г) и без нее (д, е)

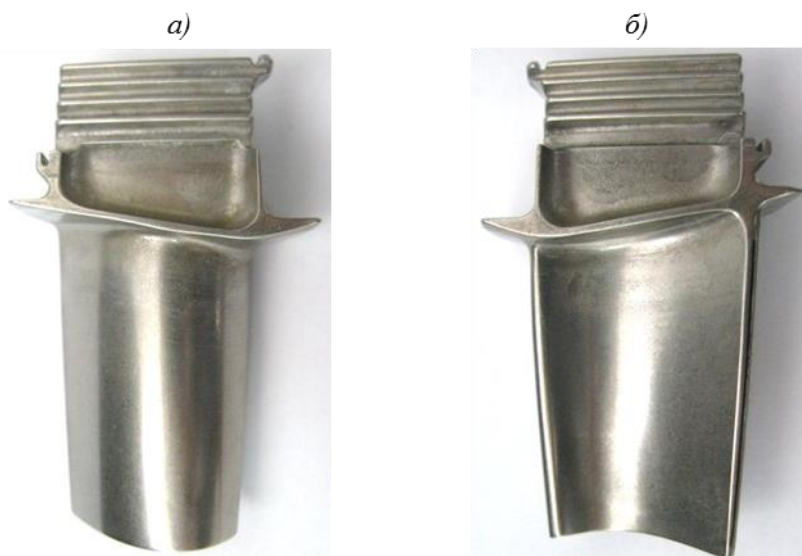


Рис. 3. Результаты электролитно-плазменного струйного удаления покрытия ВСДП-3+ВСДП-16 с лопаток турбины ГТД из жаропрочного никелевого сплава ЖС26

Общая продолжительность удаления покрытия с одной лопатки турбины из сплава ЖС26 с серийным покрытием ВСДП-3+ВСДП-16 без наработки составила 120 мин при условии применения одной направленной струи. Продолжительность удаления покрытия можно существенно сократить благодаря применению двух или четырех струйных потоков электролита. Геометрические размеры лопаток при струйной электролитно-плазменной обработке сохраняются, поверхность ровная с зеркальным блеском благодаря финишной обработке в растворе щелочи низкой концентрации.

При удалении покрытия в струе электролита важно производить фильтрацию электролита от продуктов коррозии. В противном случае наличие дисперсных частиц в составе пароплазменного слоя приводит к изменению химических процессов на поверхности обрабатываемого изделия: процесс травления сменяется процессом насыщения изделия с покрытием различными элементами, входящими в состав пароплазменного слоя: кислородом, азотом, углеродом и другими элементами.

Обсуждение и заключения

Реализация электролитно-плазменной обработки поверхности лопаток ГТД с жаростойкими покрытиями способом направленной струи электролита открывает широкие возможности для ремонта дорогостоящих лопаток ГТД, обеспечивая высокоинтенсивное удаление поврежденных при эксплуатации жаростойких покрытий. Существенным преимуществом струйной электролитно-плазменной обработки является достижение равномерности удаления покрытия, несмотря на различие толщины покрытия на разных участках обрабатываемого изделия. Электролиты, используемые при струйной электролитно-плазменной обработке, универсальны и могут использоваться для удаления жаростойких конденсационно-диффузионных покрытий различного состава с изделий из жаропрочных никелевых сплавов.

Подобран состав электролитов для последовательного удаления внешнего и внутреннего слоя жаростойких конденсационно-диффузионных покрытий, предотвращающий развитие дефектов на поверхности сплава (основы) с покрытием после наработки, для которой характерно наличие диффузионной зоны.

Установлено, что интенсивное удаление покрытий осуществляется в электролитах, имеющих фтористый анион в своем составе. Смягчение травящего действия пла-

виковой кислоты в составе пароплазменного слоя возможно благодаря наличию гидроксид-ионов, что делает более целесообразным использование раствора фтористого калия в качестве реактива для травления.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н., Орлов М.Р., Оспенникова О.Г. Механизмы образования пористости в монокристаллических лопатках турбины и кинетика ее устранения при горячем изостатическом прессовании // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 117–129.
3. Светлов И.Л., Хвацкий К.К., Горбовец М.А., Беляев М.С. Влияние горячего изостатического прессования на механические свойства литейных никелевых жаропрочных сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №3 (36). С. 10–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-10-14.
4. Быбин А.А., Невьянцева Р.Р., Смольникова О.Г. Закономерности удаления внешней и внутренней зон жаростойкого алюминидного покрытия с длительной наработкой при ремонте лопаток ТВД // *Вестник УГАТУ*. 2008. Т. 10. №1 (26). С. 127–130.
5. Лесников В.П., Кузнецов В.П., Коротких А.В. Технология восстановительного ремонта турбинных лопаток ГТД // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2004. №7 (15). С. 236–239.
6. 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.
7. 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.
8. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Смиронов А.А. Получение керамических теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД магнетронным методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №4. С. 3–8.
9. Попова С.В., Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Электролитно-плазменная финишная обработка металлов и сплавов // *Письма о материалах*. 2015. Т. 5. №1. С. 39–42.
10. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Косьмин А.А. Удаление жаростойких покрытий с поверхности пера лопаток турбин в водных малоконцентрированных растворах // *Технология металлов*. 2006. №11. С. 15–24.
11. Куликов И.С. и др. Электролитно-плазменная обработка материалов. Минск: Беларус. Навука, 2010. 232 с.
12. Галоян А.Г., Мубояджян С.А., Кашин Д.С. Формирование термодиффузионных барьерных слоев на поверхности безуглеродистых жаропрочных рений и рений-рутенийсодержащих сплавов методом газовой цементации // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №3 (36). С. 27–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-27-37.
13. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Чубаров Д.А. Технологии получения ионно-плазменных жаростойких подслоев с повышенным содержанием алюминия для перспективных ТЗП // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №5. С. 56–60. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-5-56-60.
14. Лазаренко Б.Р., Дураджи В.Н., Брянцев И.В. О структуре и сопротивлении приэлектродной зоны при нагреве металлов в электролитной плазме // *Электронная обработка материалов*. 1980. №2. С. 50–55.
15. Погребняк А.Д., Кульменьева О.П. и др. Процессы массопереноса и легирования при электролитно-плазменной обработке чугуна // *Письма в ЖТФ*. 2003. Т. 29. Вып. 8. С. 8.