

УДК 629.7.023.224:621.357

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

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ ЖАРСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ С ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-4-4

Рассмотрен процесс удаления покрытий с поверхности деталей сложного профиля из жаропрочных никелевых сплавов в плазме электролита, представляющего собой нейтральный раствор низкой концентрации. Электролитно-плазменная обработка осуществляется при катодной поляризации обрабатываемой детали во избежание чрезмерного травления основы. Изучена зависимость равномерности и скорости удаления покрытий от их состава, состава электролита и параметров обработки: напряжения, температуры, соотношения между периодом пакета импульсов постоянного тока и длительности паузы между импульсами.

Ключевые слова: электролитно-плазменная обработка, травление, ионно-плазменное покрытие, жаростойкое покрытие, микродуговой разряд.

The article is considering the process of coating removal from the surface of complicated profile parts of high-temperature nickel alloys in plasma of electrolyte which is a neutral low concentration solution. Electrolytic plasma treatment is performed through the cathodic polarization of the treated part to avoid over etching of the base. The characteristic curve of the uniformity and velocity of the coating removal on electrolyte composition and processing optionssuch as voltage, temperature, ratio between period of direct current pulse packet and spacing interval is studied.

Keywords: electrolytic-plasma treatment, etching, ion-plasma coating, high-temperature coating, micro-arc discharge.

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 в значительной степени зависит от надежности работы лопаток турбины, поскольку они являются наиболее нагруженными деталями. Рабочие лопатки турбины подвергаются действию статических, динамических, циклических нагрузок, а также испытывают циклические термические напряжения, работают в условиях агрессивной газовой среды при высокой температуре и газовой коррозии. Для защиты лопаток от высокотемпературной коррозии на поверхность деталей из жаропрочных никелевых сплавов наносят жаростойкие и коррозионностойкие покрытия.

При нарушении технологического процесса напыления на пере лопаток могут появляться различные дефекты, недопустимые по условиям эксплуатации изделия. Для повышения выхода годной продукции в процессе серийного производства необходима технологи ремонта, позволяющая проводить удаление жаростойких алюминидных покрытий с обеспечением необходимого уровня характеристик поверхности деталей для последующего нанесения покрытий.

Кроме того, при эксплуатации лопаток ГТД вследствие протекания процессов высокотемпературной коррозии происходит потеря работоспособности защитного

покрытия. Такое покрытие при проведении регламентных работ подлежит удалению с обеспечением требуемого качества поверхности подложки для повторного нанесения покрытия на поверхность деталей. Вместе с тем в процессе эксплуатации ГТД покрытия разрушаются неравномерно по элементам и поверхностям лопатки. Этот процесс обусловлен пространственной формой элементов лопатки и кинематикой ее движения, а также особенностями движения газовых потоков в тракте двигателя и действием частиц пыли и жидкости [1].

В настоящее время в промышленности удаление жаростойких покрытий осуществляют преимущественно химическим или электрохимическим методами, что обусловлено простотой указанных процессов, отсутствием необходимости использования дорогостоящего импортного оборудования [2–4]. Существенными недостатками методов химического и электрохимического травления покрытий является высокая агрессивность используемых растворов, затраты на утилизацию отработанных растворов, загрязнение окружающей среды, в ряде случаев низкая избирательность травления.

Большой интерес вызывает процесс удаления покрытий в плазме электролита ввиду его экологичности и отсутствия необходимости капитальных вложений на закупку дорогостоящего импортного оборудования.

В работе приводятся результаты исследования особенностей процесса удаления жаростойких покрытий в плазме электролита, в том числе кинетические закономерности процесса, влияние параметров процесса на качество обработанной поверхности и равномерность удаления покрытий.

Материалы и методы

Разработана экспериментальная установка электролитно-плазменной обработки, включающая в себя травильную ванну, инвертор электрического смещения ELB-50/400 с ключом дугогашения – генератором паузы, который срабатывает при резком увеличении скорости нарастания тока в цепи, систему охлаждения (рис. 1). Наличие ключа дугогашения в схеме инвертора электрического смещения позволяет предотвратить переход разряда из слаботоочного режима в сильнотоочный, который проявляется в повышении концентрации заряженных частиц в плазме и, как следствие, резком уменьшении сопротивления плазменного слоя.

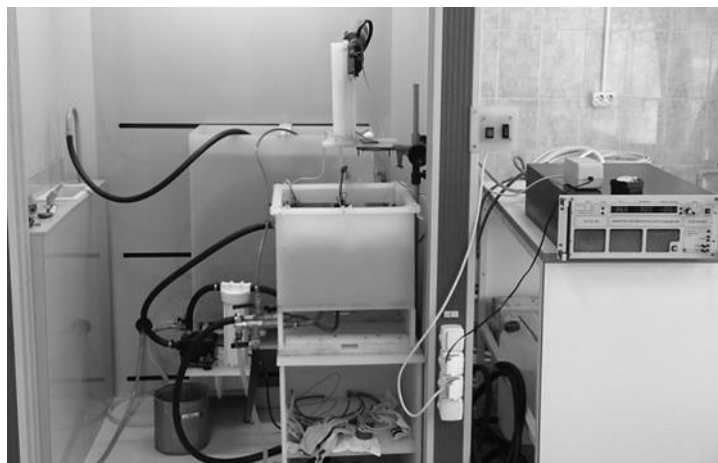


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки для электролитно-плазменной обработки

Обработку проводили при катодной поляризации обрабатываемого изделия во избежание формирования на его поверхности толстых оксидных пленок и снижения вероятности размерного травления изделия.

В качестве образцов использовали пластины размером 50×150×4 мм из никелевого сплава ЖС32 с покрытиями на алюминиевой (ВСДП-11, ВСДП-16, ВСДП-18) и никелевой (СДП-1 и СДП-2) основе и рабочие лопатки турбины из сплава ЖС32 с отработавшим покрытием ВСДП-11 [5–11]. Толщина покрытия на пластинах и лопатках составила 70 и 60–90 мкм соответственно. Для повышения достоверности экспериментальных данных при построении зависимостей использовали по пять одинаковых образцов на каждую точку.

Скорость удаления покрытия контролировали гравиметрическим способом: каждые 15 мин производили визуальный контроль поверхности обрабатываемых изделий и их взвешивание. Для исследования влияния состава травильного раствора на скорость удаления покрытий были приготовлены однокомпонентные растворы трех концентраций: 3, 5 и 7% (по массе). Предварительный выбор компонентов электролита осуществлялся исходя из давления насыщенных паров их раствора.

Металлографический анализ шлифов проводили на электронном микроскопе Olympus GX-51, детальное исследование поверхности основы после травления – с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6490LV.

Результаты

При погружении обрабатываемого изделия в электролит и постепенном нарастании потенциала на его поверхности происходит локальный разогрев электролита и его кипение в зоне обрабатываемого изделия. По мере того как поверхность обрабатываемого изделия разогревается, обычное пузырьковое кипение переходит в пленочное, т. е. образуется сплошная парогазовая прослойка между поверхностью изделия и электролитом. Ввиду ее высокого сопротивления практически весь прикладываемый потенциал (230–350 В) локализуется в этой узкой приэлектродной зоне, размер которой не превышает 3 мм [12, 13]. Когда напряженность поля в этой локальной зоне достигает критических значений (10^5 – 10^6 В/см), наблюдается ударная ионизация парогазовой прослойки с преобразованием ее в плазменный слой. Мигрирующие по поверхности обрабатываемого изделия микродуговые разряды, токоперенос в которых осуществляется за счет автоэлектронной эмиссии, создают на ней локальные зоны высокого давления и температуры, что позволяет осуществить равномерное удаление покрытий [14–16]. Результаты исследования скорости удаления покрытий представлены в таблице.

Скорость удаления покрытий в зависимости от их состава и состава раствора

Состав раствора	Концентрация электролита, % (по массе)	Скорость удаления покрытия, мг/(см ² ·мин)				
		ВСДП-11	ВСДП-16	ВСДП-18	СДП-1	СДП-2
NH ₄ NO ₃	3	0,01	0,01	0,01	0,007	0,004
	5	0,02	0,02	0,02	0,013	0,009
	7	Неустойчивая плазма				
NH ₄ F	3	0,7	0,7	0,7	0,5	0,3
	5	1,2	1,2	1,2	1,0	0,8
	7	Неустойчивая плазма				
(NH ₄) ₂ SO ₄	3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,1
	5	0,6	0,6	0,6	0,4	0,2
	7	Неустойчивая плазма				
(NH ₄) ₃ PO ₄	3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,08
	5	Неустойчивая плазма				
	7	Неустойчивая плазма				
NaHCO ₃	3	0,02	0,02	0,02	0,009	0,007
	5	0,03	0,03	0,03	0,01	0,008
	7	0,03	0,03	0,03	0,01	0,007

Неустойчивость плазмы, которая наблюдается с увеличением концентрации растворов, объясняется повышением количества активных частиц (атомарных: водорода, кислорода, фтора; свободных радикалов и электронов) в плазменном слое и интенсивным нарастанием плотности тока, что приводит к срабатыванию ключа дугогашения, предотвращающего переход в дуговой разряд. По результатам исследования установлено, что наибольшая скорость удаления покрытия достигается при использовании фтористого аммония в качестве основного компонента электролита.

После обработки в однокомпонентных растворах на поверхности образцов образуется налет из продуктов травления. Во избежание формирования налета в электролит следует добавлять комплексообразователь – динатриевую соль этилендиаминтетрауксусной кислоты (трилон Б), который при взаимодействии с продуктами травления покрытия образует растворимые комплексные соли, благодаря чему поверхность очищается от налета. Установлено, что оптимальная концентрация трилона Б в растворе составляет 0,4–0,8% (по массе).

Электропитание процесса удаления покрытия пакетами импульсов постоянного тока предотвращает формирование на поверхности катодных дуговых привязок так называемых катодных пятен диаметром до 10–100 мкм, высокая плотность тока в которых может приводить к оплавлению и разрушению материала подложки. Формирование катодных пятен и нарастание плотности тока происходит в течение нескольких десятков микросекунд. Соотношение между периодом пакета импульсов постоянного тока и паузы между пакетами импульсов (обозначим его коэффициентом k) должно быть оптимальным для самогашения катодных дуговых привязок. Установлено, что при значении коэффициента $k < 0,7$ снижается скорость электроэрозионного травления, и наоборот, при $k > 0,85$ происходит интенсивное нарастание плотности тока и переход многочисленных микродуговых разрядов в дуговой разряд.

Количество активных частиц в плазме косвенно можно определить по светимости (температуре) плазмы, цвет которой может меняться от красного до синего: чем ближе свечение плазмы к синему цвету, тем выше ее температура. При исследовании влияния температуры электролита на скорость удаления покрытия и стабильность плазмы установлено, что повышение температуры электролита от 20 до 40°C не влияет на скорость удаления покрытия. Цвет свечения плазмы не изменяется при варьировании температуры электролита в указанном диапазоне. Дальнейшее повышение температуры электролита приводит к постепенному изменению цвета плазмы до красного и снижению скорости удаления покрытия. При температуре электролита 80–90°C происходит интенсивное кипение электролита в приэлектродной области, увеличение толщины плазменной оболочки и ее схлопывание.

Проведены исследования по влиянию величины напряжения на травление покрытия в электролитной плазме. Травление проводилось при напряжении 280, 320, 360 В. Зависимость скорости удаления покрытия ВСДП-11 от величины напряжения в 5%-ном растворе NH_4F представлена на рис. 2.

По результатам металлографического анализа установлено, что высокое напряжение приводит к микроэрозионным разрушениям основы обрабатываемых изделий. Снижение напряжения приводит к спаду скорости травления. Микроструктура образцов из сплава ЖС32 с покрытием ВСДП-11 до и после обработки при различных значениях напряжения представлена на рис. 3.

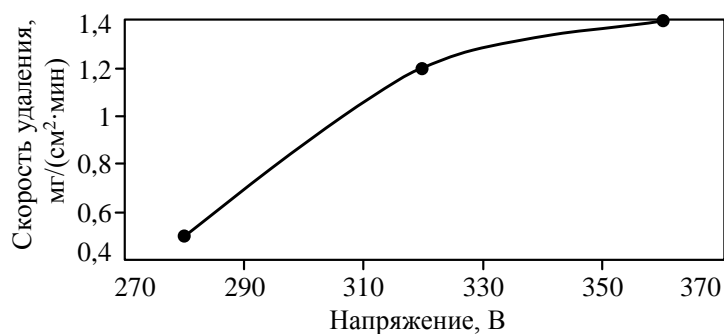


Рис. 2. Зависимость скорости удаления покрытия ВСП-11 от величины напряжения в 5%-ном растворе NH_4F

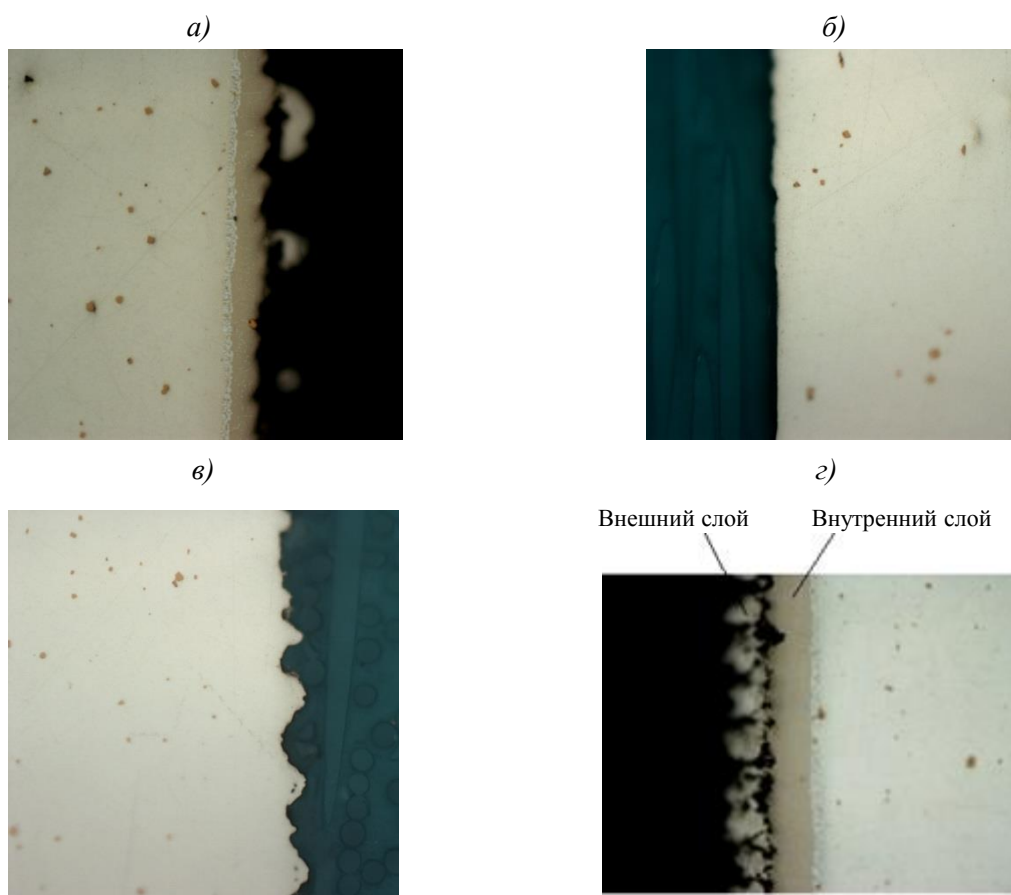


Рис. 3. Микроструктура ($\times 250$) образцов из сплава ЖС32 с покрытием ВСП-11 после травления в электролитной плазме в 5%-ном растворе NH_4F +трилон Б (продолжительность обработки 30 мин) при напряжении 280 (а), 320 (б), 360 В (в) и без обработки (г)

Результаты более детального исследования поверхностного слоя образцов после удаления покрытия с помощью растровой электронной микроскопии представлены на рис. 4. Видно, что при напряжении $U=320$ В поверхность основы ровная, без микроразрушений, в то время как при напряжении $U=360$ В наблюдается противоположная картина: многочисленные участки облачной пористости, свидетельствующие о микроразрушениях основы в процессе обработки. Образующиеся микрорыхлоты приводят при дальнейшей обработке к формированию микропустот и увеличению их размеров с образованием зубчатой поверхности (рис. 3, в).

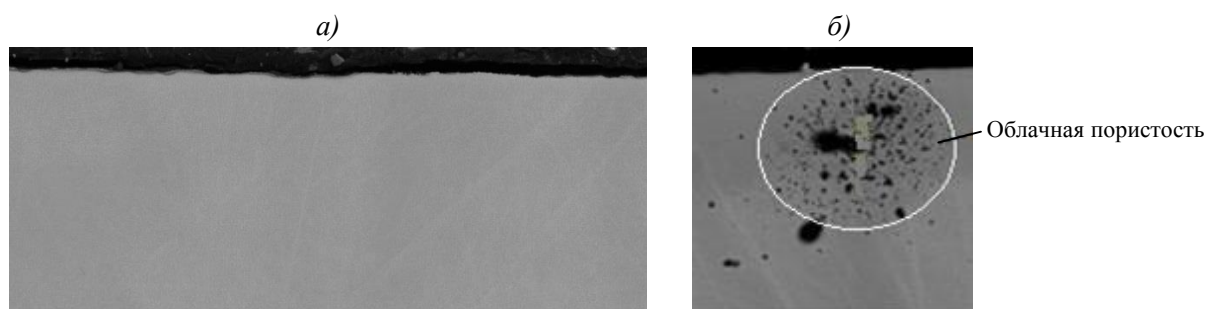


Рис. 4. Микроструктура ($\times 1000$) образцов из сплава ЖС32 с покрытием ВСДП-11 после травления в электролитной плазме в 5%-ном растворе NH_4F +трилон Б (продолжительность обработки 30 мин) при напряжении 320 (а) и 360 В (б)

Аналогичные результаты получены также для покрытий других составов, приведенных выше.

При обработке в плазме электролита рабочих лопаток ГТД с отработавшим свой ресурс покрытием ВСДП-11 обнаружено, что оно удаляется неравномерно, и это может привести к локальным перетравам основы. В результате проведенных исследований и наблюдений установлено, что на участках, где покрытие полностью удалено, свечение плазмы меняется с синего на желтый, наблюдается понижение плотности микродуговых разрядов. Изменение спектра свечения плазмы свидетельствует о понижении ее энергии. Это означает, что энергия активных частиц в плазме также снижается. Визуальный осмотр поверхности пера лопатки ГТД после длительной обработки показал отсутствие перетравов и равномерное удаление покрытия по всей поверхности пера. Однако время, необходимое для удаления покрытия с труднодоступных участков поверхности, увеличивается в два раза по сравнению со временем удаления покрытия на плоских образцах. Вероятно, неравномерность удаления покрытия в первые интервалы времени связана с неравномерностью толщины плазменного слоя по профилю пера вследствие его сложной геометрической формы. Управление толщиной плазменного слоя является сложной проблемой, решаемой в рамках гидродинамики. В связи с этим наиболее простым решением проблемы равномерного удаления покрытия на изделиях сложной геометрии является локальное изменение потенциала на участках поверхности, где толщина плазменного слоя максимальная.

Обсуждение и заключения

Наиболее высокая скорость удаления жаростойких алюминидных покрытий на поверхности жаропрочных никелевых сплавов достигается в растворе фтористого аммония с добавкой трилона Б. Скорость удаления покрытий на алюминиевой основе превосходит скорость удаления покрытий на никелевой основе, что можно объяснить более низким содержанием легирующих элементов в составе β -фазы.

Равномерность удаления жаростойких покрытий на поверхности никелевого сплава достигается в импульсном режиме обработки при соотношении между периодом пакета импульсов постоянного тока и паузы между пакетами импульсов $0,7 \leq k \leq 0,85$.

С увеличением температуры электролита начинается его интенсивное кипение в зоне обрабатываемого изделия, из-за чего происходит увеличение толщины плазменной оболочки и ее схлопывание. В итоге это приводит сначала к уменьшению скорости травления, а затем к дестабилизации процесса при схлопывании плазменной оболочки.

На равномерность удаления покрытий в плазме электролита оказывает влияние не только состав электролита, температура, напряжение и коэффициент заполнения па-

кета импульсов тока, но также и гидродинамика пленочного кипения в зоне обрабатываемого изделия, а следовательно, и геометрия изделия. Скорость полного удаления покрытий на изделиях сложной геометрии существенно падает, что является проблемой для дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов Д.А., Недашковский А.П., Ивченко Т.Г. Технологические особенности восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий // Прогрессивные технологии и системы машинооборудования. 2014. №1 (47). С. 213–224.
2. 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.
3. Лесников В.П., Кузнецов В.П., Коротких А.В. Технология восстановительного ремонта турбинных лопаток ГТД // Авиационная космическая техника и технология. 2004. №7 (15). С. 236–239.
4. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
5. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Защитные покрытия лопаток турбин ГТД / В кн. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002: юбилейный науч.-технич. сб. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 70–81.
6. 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.
7. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 71–81.
8. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Защитные жаростойкие покрытия для сплавов на основе интерметаллидов никеля // Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 12–15.
9. 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.
10. Гаямов А.М., Будиновский С.А. Исследование влияния толщины барьерного слоя покрытия на свойства композиций из жаропрочных сплавов ВЖМ1 и ЖС36 с жаростойким покрытием // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №9. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.06.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-3-3.
11. 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.
12. Крюков А.П., Пузина Ю.Ю. Определение толщины паровой пленки в задаче о пленочном кипении недогретой жидкости / В сб. трудов V Российской национальной конф. по теплообмену. М.: Издательский дом МЭИ. 2010. Т. 4. С. 100–103.
13. Лазаренко Б.Р., Дурадзи 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.
14. Будиновский С.А., Мубояджян С.А. Разработка новых процессов удаления отработанных жаростойких алюминидных покрытий с поверхности пера рабочих лопаток турбин / В сб. Авиационные материалы и технологии. М.: ВИАМ. 2005. №1. С. 40–49.
15. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Ягодкин Ю.Д. Перспективы применения ионно-плазменной технологии высоких энергий для межресурсного ремонта лопаток турбин / В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. «Ремонтные технологии в авиастроении». М.: ВИАМ, 2002. С. 6–13.
16. Попова С.В., Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Электролитно-плазменная финишная обработка металлов и сплавов // Письма о материалах. 2015. Т. 5. №1. С. 39–40.