

УДК 621.793.324

Е.В. ПАРФЕНОВ, А.А. БЫБИН, Р.Р. НЕВЬЯНЦЕВА*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия*

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО УДАЛЕНИЯ ДЕФЕКТНЫХ ПОКРЫТИЙ С ДЕТАЛЕЙ ГТД

Рассмотрены экологические аспекты процессов удаления ряда функциональных защитных покрытий химическим и электролитно-плазменным методом. Предложена методика оценки экологической эффективности рассматриваемых процессов с учетом требований международного стандарта ИСО 14000. Показано, что для электролитно-плазменного метода экологическая эффективность на 20 % выше по сравнению с химическим методом удаления дефектных покрытий. Установлено, что электролитно-плазменный метод наиболее эффективен при съеме многофазных покрытий, а при удалении простых покрытий эффективность обоих методов одинакова.

Ключевые слова: защитное покрытие, удаление покрытий, электролитно-плазменный метод, химический метод, оценка экологической эффективности, ГОСТ Р ИСО 14000.

Введение

Для обеспечения требуемого ресурса на работе поверхности ответственных деталей ГТД, включая лопатки турбины и компрессора, наносят защитные покрытия. Однако при нарушении технологического процесса нанесения защитных покрытий могут появляться различного рода дефекты, недопустимые по ТУ на такие детали. В результате появляется необходимость тщательного и полного удаления дефектного покрытия с таких деталей.

В настоящее время в условиях серийного производства наиболее широко распространен химический метод удаления дефектных покрытий. Технология предусматривает использование травильных растворов, содержащих смесь сильных неорганических кислот. Часто в состав раствора входит плавиковая кислота, которая является токсичной и не поддается утилизации. Кроме того, в растворы вводят различные активизирующие и ингибирующие добавки. Нередко процесс химического травления покрытий в таких кислотных растворах осуществляют при температурах, близких к температуре кипения, что вызывает интенсивное испарение компонентов электролита. Перечисленные факторы резко повышают экологическую нагрузку на производство.

В работе [1] для удаления защитных покрытий с деталей ГТД предложено использовать электролитно-плазменный метод. Процесс электролитно-плазменной обработки (ЭПО) является разновидностью электрохимической обработки и проводится в растворах солей, кислот и щелочей с низкой концентрацией (порядка 1...20 %) при высоких напряжени-

ях в диапазоне 100...600 В. Как правило, используемые электролиты нетоксичны и легко поддаются утилизации. Отличительной особенностью процесса ЭПО является образование парогазовой оболочки (ПГО) вокруг электрода меньшей площади (активного электрода). Происходящие в ПГО процессы достаточно сложны и включают не только химические и электрохимические, но и плазмохимические реакции, а также электроразрядные и гидродинамические явления [2]. Сочетание данных процессов позволяет удалять дефектные покрытия с достаточно высокой скоростью при одновременном обеспечении качества поверхности подложки, удовлетворяющей требованиям повторного нанесения покрытия. Вместе с тем, использование высоких напряжений и температур раствора порядка 50...90 °С может вызвать сомнения в экологической эффективности процесса электролитно-плазменного удаления дефектных покрытий.

Целью данной работы является проведение сравнительной оценки экологической эффективности химического и электролитно-плазменного методов удаления защитных покрытий, используемых при ремонте ответственных деталей ГТД, включая лопатки турбины и компрессора газогенератора.

1. Методика проведения исследования

Сравнительная оценка экологической эффективности указанных методов проводилась в соответствии с требованиями действующего в РФ стандарта ГОСТ Р ИСО 14031-98 «Управление окружающей средой. Оценивание экологической эффективности. Общие требования». Стандарт оговаривает, что оценивание экологической эффективности (ОЭЭ) – это процесс

принятия управленческих решений методом выбора показателей, сбора и анализа данных, оценки информации по критериям экологической эффективности. С этой целью в ГОСТ Р ИСО 14031 приводятся две категории показателей оценивания экологической эффективности: показатели экологической эффективности (ПЭЭ) и показатели состояния окружающей среды (ПСОС). В свою очередь ПЭЭ подразделяются на показатели эффективности управления (ПЭУ) и показатели эффективности функционирования (ПЭФ).

Следует отметить, что показатели состояния окружающей среды охватывают достаточно большую территорию, например, завода, жилого района города и т.п. Поэтому в рамках данной работы показатели ПСОС не рассматривались, а учитывались только показатели экологической эффективности.

Показатели экологической эффективности рассчитывались исходя из информации о составах рабочих растворов и условиях удаления различных типов покрытий, представленной в табл. 1.

Таблица 1

Информация о составах рабочих растворов

Материал подложки, защитное покрытие, его толщина и способ нанесения	Состав раствора, режим удаления покрытия		Ссылка
	химический метод	электролитно-плазменный метод	
сталь ЭИ961ш, ионно-плазменное TiN, 5...7 мкм, метод КИБ	HF, 100 г/л; HCl, 80 г/л; H ₃ PO ₄ , 290 г/л; t = 20 °C; τ = 30 мин.	(NH ₄) ₂ SO ₄ , 50 г/л; U = 320 В; j = 0,75 А/см ² t _{нач} = 50 °C; τ = 10 мин.	[3, 4]
сплав ХН60ВТ, хромовое, 40...60 мкм, гальваническое хромирование	HCl, 190 г/л; t = 20 °C; τ = 180 мин.	(NH ₄) ₂ SO ₄ , 50 г/л; U = 370 В; j = 0,70 А/см ² t _{нач} = 50 °C; τ = 25 мин.	[7, 8]
сплав ЖС6У, диффузионное алюминидное, 45...55 мкм, метод окраски	HF, 11 г/л; порошок ПЖ4МЗ, 4 г/л; HNO ₃ , 390 г/л; t = 40 °C; τ = 80 мин.	(NH ₄) ₂ HPO ₄ , 50 г/л; U = 320 В; j = 0,75 А/см ² t _{нач} = 50 °C; τ = 20 мин.	[5, 6]

2. Результаты исследований и их обсуждение

Анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, что в химическом методе в основном используются сложные растворы, содержащие ряд экологически вредных веществ. Тем не менее, исключение их из процесса может привести к невозможности функционирования системы. Так, ионно-плазменное покрытие TiN и диффузионное алюминидное покрытие требуют введения в электролит плавиковой кислоты из-за ее способности образовывать комплексные соединения с элементами покрытия. Невозможно также исключить соляную и азотную кислоты, являющихся сильными окислителями, а фосфорную кислоту и порошок железа – в виду их ингибирующего действия на подложку. Присутствие в растворе только соляной кислоты при удалении хромового покрытия без дополнительных компонентов обуславливает большую длительность процесса, а соответственно и время вредного воздействия на окружающую среду.

Несмотря на то, что химическое удаление покрытий, перечисленных в табл. 1, проводится при температурах раствора, близких к комнатной, следует иметь в виду, что такие кислоты, как соляная и плавиковая, применяемые практически во всех случаях, обладают низкой температурой кипения. Поэтому при оценивании экологической эффективности необходимо учитывать класс опасности и предельно допустимые концентрации (ПДК) компонен-

тов раствора, как в сточных водах, так и в воздухе рабочей зоны, что выдвигает также требования по использованию вытяжной вентиляции соответствующей мощности.

В отличие от химического метода, при электролитно-плазменной обработке используют разбавленные растворы, содержащие только один компонент в виде неорганической аммонийной соли. Однако проведение процесса при повышенной температуре может способствовать разложению соли аммония с выделением аммиака. Кроме того, для возникновения и функционирования парогазовой оболочки необходимо использование высоких напряжений, что вызывает параметрическое загрязнение, воздействующее на рабочий персонал. Вместе с тем, в Российской Федерации отсутствуют нормы по безопасному уровню воздействия электромагнитного излучения на человека. В связи с этим в работе для оценки уровня параметрического загрязнения, связанного с использованием электрической энергии, учитывались затраты электроэнергии на обработку единицы поверхности за полное время процесса.

Таким образом, применительно к процессам химического и электролитно-плазменного удаления дефектных покрытий для процедуры оценивания экологической эффективности были выбраны следующие показатели:

1) показатели ПЭФ:

– суммарный коэффициент загрязненности рабочего раствора (k_{pp});

– суммарный коэффициент загрязненности воздуха рабочей зоны ($k_{ВРЗ}$);

– токсичность рабочего раствора ($T_{РР}$);

– токсичность паров ($T_{П}$);

– затраты электроэнергии на обработку единицы площади поверхности ($ЗЭ$);

2) показатели ПЭУ:

– время воздействия вредных факторов ($\tau_{ВФ}$).

Для определения значений выбранных показателей выполнены следующие расчеты. Суммарные коэффициенты $k_{РР}$ и $k_{ВРЗ}$ определялись с учетом предельно-допустимой концентрации и концентрации загрязнителей в рабочем растворе или в воздухе рабочей зоны и представляли собой величину, определяемую по следующей формуле с учетом эффекта суммации:

$$k = \sum_i \frac{C_i}{ПДК_i}, \quad (1)$$

где C_i – значение концентрации для i -го компонента в рабочем растворе или в воздухе рабочей зоны; ПДК $_i$ – значение предельно-допустимой концентрации для i -го компонента в рабочем растворе или в воздухе рабочей зоны.

Оценка концентрации загрязнителей в воздухе рабочей зоны проводилась на основе расчета парциальных давлений компонентов раствора [9].

Токсичность рабочего раствора и паров в воздухе рабочей зоны определяли по классу опасности веществ для наиболее опасного компонента. Численные значения ПДК и классы опасности для анализируемых компонентов рабочих растворов приведены в соответствующих гигиенических нормативах ГН 2.1.5.1315-03 и ГН 2.2.5.1313-03 [10, 11].

Затраты электроэнергии на обработку единицы площади поверхности рассчитывались с учетом энергетических затрат, связанных с обеспечением определенной плотности тока через поверхность детали во время обработки, требуемой температуры рабочего раствора и затрат на работу вентиляционного оборудования. Расчет величины $ЗЭ$ проводится по формуле:

$$ЗЭ = \frac{C \cdot m \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{\tau} + U \cdot j \cdot S + P_{В}}{S} \cdot \tau, \quad (2)$$

где C – удельная теплоемкость раствора; m – масса рабочего раствора; ΔT – разность требуемой температуры рабочего раствора и температуры окружающей среды; U – напряжение между анодом и катодом; j – плотность тока во время обработки; S – площадь обрабатываемой поверхности; $P_{В}$ – мощность вентиляционного оборудования; τ – длительность обработки.

При определении времени воздействия вредных и опасных факторов на персонал учитывалось, что при организации эффективного управления процессом обеспечивается минимальная длительность обработки детали и, соответственно, минимальное значение параметра $\tau_{ВФ}$. Длительность обработки устанавливалась на основании экспериментальных исследований.

Расчетные значения всех выбранных параметров для химического и электролитно-плазменного метода представлены в табл. 2. При расчетах приняты следующие значения параметров: площадь обработки $S = 200 \text{ см}^2$, мощность вентиляции для химического метода $P_{В} = 2,5 \text{ кВт}$ и для электролитно-плазменного $P_{В} = 1 \text{ кВт}$.

Таблица 2

Расчетные значения выбранных параметров для химического и электролитно-плазменного метода

Метод обработки	Покрытие	Показатели ОЭЭ					
		$k_{РР}$	$k_{ВРЗ}$	$T_{РР}$	$T_{П}$	$ЗЭ, \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$	$\tau_{ВФ}, \text{ ч}$
Химический	нитрид титана	149752	2174	2	2	63	0,5
	хромовое	543	37	4	2	375	3,0
	алюминидное	29333	700	2	2	171	1,3
Электролитно-плазменный	нитрид титана	9073	1280	4	4	506	0,2
	хромовое	9073	1280	4	4	1072	0,4
	алюминидное	19286	748	3	4	751	0,3

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что суммарные коэффициенты загрязненности рабочего раствора и воздуха рабочей зоны достаточно велики для обоих сравниваемых методов. Однако по параметрам токсичности растворов и паров электролитно-плазменный метод намного предпочтительнее химического. Затраты электроэнергии для электролитно-плазменного метода закономерно оказываются выше, чем для химическо-

го, однако различия в значениях получаются менее, чем на порядок. По параметру времени воздействия вредных факторов электролитно-плазменный метод оказывается также предпочтительнее химического в связи с большей производительностью процесса.

Разнонаправленность полученных результатов требует проведения комплексного анализа данных, например на основе метода балльных оценок. Экспертная оценка уровней значимости для суммарных

коэффициентов загрязненности, затрат электроэнергии, времени воздействия вредных факторов показывает, что аналогично классам опасности веществ можно ввести шкалу баллов от 1 до 4, соответствующих минимальной и максимальной экологической эффективности (табл. 3). Показатели ОЭЭ, выраженные в баллах, приведены в табл. 4.

Анализ полученных значений экологической эффективности показывает, что для относительно «сложных» многофазных покрытий (нитрид титана, алюминидное диффузионное покрытие) эффективность процесса электролитно-плазменного удаления по сравнению с химическим методом превышает

аналогичный показатель на 30...40 %. В случае хромового покрытия, которое может быть охарактеризовано как более «простое» и однофазное, показатель экологической эффективности для обоих методов одинаков.

Таблица 3

Шкала баллов

Балл	$k_{pp}, k_{вpз}$	$T_{pp}, T_{п}$	$ЗЭ, кВт \cdot ч/м^2$	$\tau_{вф}, ч$
4	0...1000	4	0...100	0...0,25
3	1000...10000	3	100...500	0,26...0,50
2	10000...100000	2	500...1000	0,51...1,00
1	> 100000	1	> 1000	> 1,00

Таблица 4

Показатели ОЭЭ, выраженные в баллах

Метод обработки	Покрытие	Показатели ОЭЭ (балльная оценка)							Средний балл
		k_{pp}	$k_{вpз}$	T_{pp}	$T_{п}$	$ЗЭ$	$\tau_{вф}$	Сумма	
Химический	нитрид титана	1	3	2	2	4	3	15	14,7
	хромовое	3	4	4	2	3	1	17	
	алюминидное	1	3	2	2	3	1	12	
Электролитно-плазменный	нитрид титана	3	3	4	4	2	4	20	18,3
	хромовое	3	3	4	4	1	3	18	
	алюминидное	2	3	3	4	2	3	17	

Заключение

Таким образом, проведенный комплекс работ позволил в рамках требований стандарта серии ИСО 14000 разработать подход к оценке экологической эффективности электролитно-плазменного метода удаления ряда защитных покрытий с поверхности деталей ГТД, подлежащих ремонту. Показано, что в целом экологическая эффективность электролитно-плазменного метода на 20 % выше по сравнению с химическим методом удаления дефектных защитных покрытий.

Благодарности

Авторы благодарят Министерство образования и науки РФ за финансовую поддержку исследований по государственным контрактам № 02.442.11.7501 и 02.444.11.7245.

Литература

1. Пат. 2094546 Российская Федерация, МПК 6 С 25 F 5/00. Способ удаления покрытия с металлической подложки / Амирханова Н.А., Невьянцева Р.Р., Белоногов В.А., Тимергазина Т.М.; Заявитель и патентообладатель УГАТУ. – № 95104824/02; заявл. 03.04.1995; опубл. 27.10.1997, Бюл. № 30.

2. The influence of vapor-gaseous envelope behavior on plasma electrolytic coating removal / R.R. Ne-

vyantseva, S.A. Gorbatkov, E.V. Parfenov, A.A. Bybin // *Surface and Coatings Technology*. – 2001. – Vol. 148, № 11. – P. 30-37.

3. Пат. 2081207 Российская Федерация, МПК 6 С23F1/44, С23F1/26. Раствор для удаления покрытий из нитрида и карбонитрида титана / Амирханова Н.А., Невьянцева Р.Р., Тимергазина Т.М.; Заявитель и патентообладатель УГАТУ. – № 95110172/02; заявл. 15.06.1995; опубл. 10.06.1997, Бюл. № 16.

4. Выбор способа удаления покрытия TiN с поверхности мартенситной стали для разработки технологических рекомендаций ремонта лопаток энергоустановок / Р.Р. Невьянцева, А.А. Быбин, Е.В. Парфенов, Н.Ф. Измайлова // *Вестник УГАТУ*. – 2009. – Т. 12, № 2. – С. 103-107.

5. Смольникова О.Г. Поиск эффективного состава электролита для удаления алюминидных жаростойких покрытий / О.Г. Смольникова, А.А. Быбин, Р.Р. Невьянцева // *Мавлютовские чтения: Российск. науч.-техн. конф., посвящ. 85-летию со дня рождения чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. Р.Р. Мавлютова: сб. тр. в 5 т.; Мин-во образования и науки РФ, ГОУ ВПО УГАТУ, АН РБ, УНЦ РАН, Ин-т механики УНЦ РАН*. – Уфа, 2011. – С. 160-164.

6. Выбор оптимальных условий удаления алюминидного покрытия с поверхности жаропрочного никелевого сплава электролитно-плазменным методом / Е.В. Парфенов, Р.Р. Невьянцева, А.А. Быбин, В.Р. Мукаева // *Физика и химия обработки материалов*. – 2010. – № 4. – С. 19-24.

7. Гальванические покрытия в машиностроении: справочник. В 2-х томах / Под ред. М.А. Шлугера. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 1. – 240 с.

8. Регрессионное моделирование процесса удаления хромового покрытия методом ЭПО с деталей ГТД / Д.А. Середя, Е.В. Парфенов, Р.Р. Невьянцева, А.А. Быбин // Актуальные проблемы современной науки: II Междунар. форум: сб. тр.; Самарск. гос. техн. ун-т. – Самара, 2006. – С. 72-76.

9. Химическое равновесие и кинетика. Свойства растворов. Электродные процессы. Справочник химика. В 5-ти томах / Под ред. Б.П. Никольского. – М.: Химия, 1964. – Т. 3. – 1004 с.

10. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны:

Гигиенические нормативы. ГН 2.2.5.1313-03. [Электронный ресурс]. – М.: Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Министерства здравоохранения Российской Федерации, 2003. – Режим доступа к ресурсу: <http://files.stroyinf.ru/>. – 12.04.2011.

11. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: Гигиенические нормативы. ГН 2.1.5.1315-03. [Электронный ресурс]. – М.: Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Министерства здравоохранения Российской Федерации, 2003. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.gostrf.com/>. – 12.04.2011.

Поступила в редакцию 20.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. кафедры общей химии Л.И. Трубникова, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия.

ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОЛІТНО-ПЛАЗМОВОГО ВИДАЛЕННЯ ДЕФЕКТНИХ ПОКРИТТІВ З ДЕТАЛЕЙ ГТД

Є.В. Парфьонов, А.О. Бибін, Р.Р. Нев'янцева

Розглянуті екологічні аспекти процесів видалення ряду функціональних захисних покриттів хімічним і електролітно-плазмовим методом. Запропонована методика оцінки екологічної ефективності даних процесів з врахуванням вимог міжнародного стандарту ISO 14000. Показано, що для електролітно-плазмового методу екологічна ефективність на 20 % вище в порівнянні з хімічним методом видалення дефектних покриттів. Встановлено, що електролітно-плазмовий метод найбільш ефективний при зніманні багатофазних покриттів, а при видаленні простих покриттів ефективність обох методів однакова.

Ключові слова: захисне покриття, видалення покриттів, електролітно-плазмовий метод, хімічний метод, оцінка екологічної ефективності, ГОСТ Р ISO 14000.

ENVIRONMENTAL EFFICIENCY EVALUATION FOR PROCESSES OF PLASMA ELECTROLYTIC REMOVAL OF DEFECTIVE COATINGS FROM GTE PARTS

E.V. Parfenov, A.A. Bybin, R.R. Nevyantseva

The paper discusses environmental issues of coating stripping processes based on chemical and plasma electrolytic techniques. An approach based on ISO 14000 standard was proposed for evaluation of the environmental efficiency of the coating stripping processes. It was shown that plasma electrolytic technique is 25% more environmentally efficient than the chemical technique of the defective coating removal. It has been shown that the application of the plasma electrolytic technique is the most effective for stripping of multiphase coatings, while for simple coatings the efficiency of the both methods is similar.

Key words: protective coating, coating removal, plasma electrolytic technique, chemical technique, environmental efficiency, ISO 14000 standard.

Парфенов Евгений Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа, Россия.

Быбин Андрей Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа, Россия, e-mail: anbybin@yandex.ru.

Невьянцева Римма Рахимзяновна – канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры «Общая химия» Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа, Россия.