

УДК 620.1

*Е.Н. Азаровский¹, С.А. Мубояджян¹***ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТИ КОМПРЕССОРНЫХ СТАЛЕЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ В ТИТАНОВОЙ ПЛАЗМЕ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-8-8

Рассмотрен процесс ионного модифицирования поверхности образцов из компрессорных сталей марок ЭП866 и ЭИ961 в титановой плазме вакуумно-дугового разряда (ВДР) при значениях напряжения смещения 150; 300 и 400 В и токе дуги 300 А. Приведена зависимость удельного изменения массы образцов от параметров проведения процесса и показана зависимость изменения температуры процесса от времени обработки при напряжениях смещения 150, 300 и 400 В и постоянном значении тока вакуумной дуги. Показано, что во время проведения процесса модифицирования поверхности, при заданных значениях тока дуги и напряжениях смещения температура процесса не превышает температуру отпуска компрессорных сталей ЭП866 и ЭИ961.

Проведены металлографические исследования обработанных образцов и приведены их микроструктуры. Исследован элементный состав обработанных образцов при токе ВДР 300 А и напряжении смещения 150, 300 и 400 В, а также определены основные фазы поверхностного слоя обработанных образцов.

Проведены испытания модифицированных образцов на стойкость к солевой коррозии по методике ВИАМ при температуре 600°C и получены результаты визуального и гравиметрического контроля.

Данная работа выполнена в рамках стратегического направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные покрытия». Комплексная проблема 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионные 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») [1].

Ключевые слова: компрессорная сталь, вакуумная дуга, плазма титана, ионное модифицирование, термостимулированная ионная диффузия, ионное травление, микроструктура, электронная микроскопия.

The paper is considered the process of modifying the surface of the ion samples of steel EP866 compressor and EI961 in titanium plasma vacuum arc discharge (VAD) for the values of bias voltages of 150; 300 and 400 and a current of 300 A arc. Shows the dependence of the sample weight change on the parameters of the process and shows the change of the process temperature by the processing time at bias voltages 150; 300 and 400 and a constant value so that a vacuum arc. It was shown during the surface modification process, for given values of the arc current and the bias voltages of the process temperature does not exceed the temperature of tempering compressor steel EP866 and EI961.

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

Metallographic examinations were carried out and the treated samples are given their microstructure. We studied the elemental composition of samples processed at a current of 300 A and VAD bias voltages of 150; 300 and 400, and the main phase of the surface layer of the treated samples.

Tests of samples modified for resistance to salt corrosion VIAM procedure at a temperature of 600°C and obtained results of visual and gravimetric control. This work was performed as part of the strategic direction 17. «Comprehensive anti-corrosion protection, reinforcing, wear-resistant protective coating». Complex problem 17.3. «Multi-layer heat-resistant and heat-resistant coatings, nanostructured reinforcement erosion and corrosion-resistant, wear-resistant, antifretting coating to protect the hot section components and compressor gas turbine engines and gas turbines» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: steel compressor, vacuum arc, titanium plasma, ion modification, thermally ion diffusion, ion etching, microstructure, electron microscopy.

Введение

В настоящее время на многофункциональных истребителях морского (корабельного) базирования, таких как МиГ-29К и МиГ-29КУБ, эксплуатируется авиационный газотурбинный двигатель (ГТД) марки РД-33МК, который создан на базе материалов общеклиматического применения [2, 3]. При производстве компрессорных лопаток для этих двигателей применяют конструкционные стали, такие как ЭП866 и ЭИ961, которые обладают коррозионной стойкостью в условиях общеклиматического применения [4, 5]. Однако во время эксплуатации деталей ГТД, выполненных из этих материалов (сплавы ЭП866 и ЭИ961), в условиях всеклиматического применения выяснилось, что стойкость к солевой коррозии этих материалов неудовлетворительная и требуется разработать методы защиты их рабочей поверхности.

Для повышения защитных свойств рабочей поверхности деталей из конструкционных материалов деталей ГТД, в авиационной промышленности широко используется ионно-плазменный процесс нанесения функциональных покрытий из вакуумно-дуговой плазмы материала покрытия [6–9]. Функциональные защитные и упрочняющие покрытия толщиной свыше 5–10 мкм наносят с помощью ионно-плазменных установок (ИПУ) типа МАП (МАП-1, МАП-2, МАП-3), разработанных в ВИАМ [10–12]. Однако решением проблемы использования материалов общеклиматического применения в морских условиях или в условиях тропического климата (всеклиматического применения) послужило создание в ВИАМ технологии ионного модифицирования поверхностного слоя методом термостимулированной ионной диффузии в плазме сильноточного вакуумно-дугового разряда (ВДР) [13–18]. Эта технология применяется в промышленности для повышения коррозионной стойкости ответственных деталей ГТД путем насыщения поверхности в плазме алюминиевого сплава системы Al–Co–Si–Y.

В работах [19–24] показана перспективность метода ионно-плазменного модифицирования поверхности компрессорных сталей и установлено, что процесс термостимулированной ионной диффузии в плазме сильноточного ВДР позволяет проводить обработку ниже температуры отпуска и обеспечивает получение модифицированных слоев глубиной от долей до десятков микрометров при токе вакуумно-дугового разряда 300–600 А, напряжении смещения на обрабатываемых изделиях 150–450 В и продолжительности процесса не более 1 ч. Процесс ионного модифицирования поверхности деталей из конструкционных материалов позволяет изменять структурно-фазовое состояние поверхности, а соответственно, и свойства этих материалов, связанные с состоянием поверхности, – коррозионную стойкость, жаростойкость, длительную прочность и др.

Модифицирование поверхности в плазме ВДР позволяет значительно расширить возможности управления физико-химическими свойствами поверхности с целью повышения эксплуатационной надежности ответственных деталей машин.

Данная работа посвящена исследованию коррозионной стойкости поверхностного слоя образцов из конструкционных сталей ЭП866 и ЭИ961, подвергнутых модифицированию в титановой плазме ВДР методом термостимулированной ионной диффузии при низких значениях тока вакуумной дуги.

Материалы и методы

Модифицирование поверхности образцов из компрессорных сталей ЭИ961 и ЭП866 в титановой плазме на установке МАП-3 проводили на плоских прямоугольных образцах из стали ЭП866 с размерами сторон 12 и 25 мм при толщине 2 мм и на образцах из стали ЭИ961 размером $\varnothing 25 \times 3$ мм. В качестве материала модификатора использовали титан марки ВТ1-0, из которого был изготовлен трубный катод размером $\varnothing 180 \times 140$ мм, высотой 340 мм для ионно-плазменной установки МАП-3.

Перед началом проведения процесса модифицирования поверхность образцов подвергали опескоструиванию электрокорундом с размерами основной фракции зерна 110–120 мкм, при давлении воздуха 250 Па, в течение 2–3 мин. Финишную обработку поверхности проводили бомбардировкой поверхности ионами аргона в камере ИПУ МАП-3 по стандартному режиму с последующей очисткой ионами титана в парах плазмы вакуумно-дугового разряда. Процесс модифицирования поверхности образцов ионами титана в ВДР проводили при значении тока вакуумной дуги 300 А, продолжительности проведения процесса не более 40 мин и напряжениях смещения на образцах 150; 300 и 400 В. В процессе модифицирования фиксировали показания контрольной термопары ИПУ МАП-3, на которую подавалось напряжение смещения, равное напряжению на обрабатываемых образцах.

Гравиметрический контроль изменения массы образцов до и после обработки проводили взвешиванием на аналитических весах фирмы OHAUS с точностью 10^{-4} г.

Исследование локального химического состава образцов проводили методом микрорентгеноспектрального анализа на сканирующем растровом электронном микроскопе (РЭМ) Inspect F50 фирмы FEI (США) с использованием энергодисперсионного анализатора (EDS/ЭДА). Тип детектора энергодисперсионного анализатора – кремний-дрейфовый, с энергетическим разрешением не более 129 эВ и диапазоном детектируемых элементов от Ве (бериллий).

Для получения высокоразрешающих изображений РЭМ Inspect F50 оборудован источником Шоттки с полевой эмиссией. Ток пучка – до 2 мкА, плавно изменяемый. Разрешение по поверхности в обратнорассеянных электронах, детектируемых детектором в высоком вакууме при ускоряющем напряжении от 200 В до 30 кВ, – не более 2,3–2,5 нм соответственно.

Фазовый состав поверхности модифицированных образцов исследовали на дифрактометре D/MAX-2500 фирмы Rigaku с монохроматическим $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучением. Рентгенофазовый анализ проводили с помощью специализированной программы Jade5 и базы данных PDF2.

Сравнительные испытания образцов на солевую коррозионную стойкость проводили по методике ускоренных циклических коррозионных испытаний (УЦКИ) в соответствии с РТМ 1.2.189. Коррозионную стойкость модифицированных образцов оценивали визуально при помощи бинокулярного микроскопа МБС-2 в сравнении с образцами без ионной обработки и гравиметрическим способом путем взвешивания на аналитических весах.

Результаты

Из проведенных ранее исследований известно, что температура поверхности образцов превышает показания контрольной термопары [19–23]. С учетом этого на рис. 1 приведены результаты измерения температуры образцов в процессе их ионной обработки в зависимости от напряжения смещения. Видно, что, при постоянном значении тока вакуумно-дугового разряда и при значениях напряжения смещения 150; 300 и 400 В, конечная температура ионного нагрева образцов составляет 340; 400 и 440°C соответственно. Конечные значения контрольной термопары установки МАП-3 показывают, что, при заданных параметрах процесса обработки конструкционных сталей ЭИ961 и ЭП866 в плазме титана ВДР, модифицирование проходит при температурах ниже температуры отпуска этих сталей (630 и 650°C соответственно).

Сравнение значений контрольной термопары установки МАП-3 (рис. 1) с данными работы [22] показывает, что снижение тока обработки ВДР в 2 раза приводит к снижению температуры нагрева образцов на ~240°C.

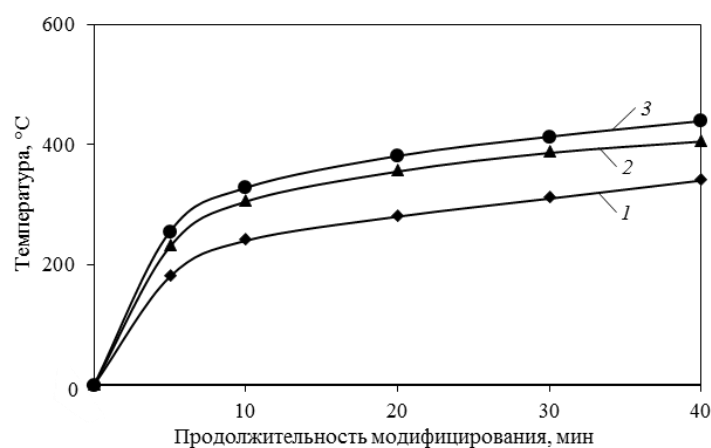


Рис. 1. Зависимость температуры поверхности образцов в камере напыления ионно-плазменной установки МАП-3 от продолжительности процесса модифицирования при токе вакуумной дуги 300 А и фиксированных значениях напряжения смещения 150 (1); 300 (2) и 400 В (3)

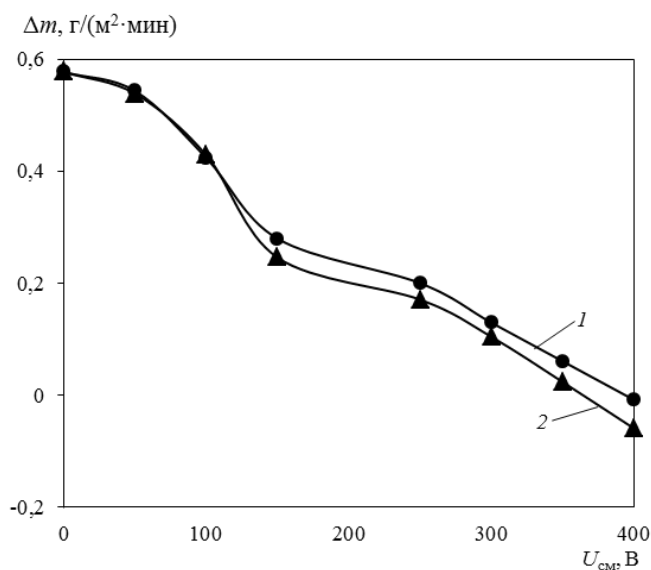


Рис. 2. Зависимость скорости удельного изменения массы Δm образцов из конструкционных сталей ЭИ961 (1) и ЭП866 (2) при ионной обработке поверхности от напряжения смещения и силы тока 300 А

На рис. 2 показана зависимость скорости изменения удельной массы образцов при ионной обработке поверхности от величины напряжения смещения подаваемого на образцы. Видно, что при значениях напряжения смещения до 100 В наблюдается снижение скорости удельного изменения массы от напряжения смещения на образцах. Это снижение с ростом $U_{см}$ связано с усилением процесса катодного распыления поверхности титанового покрытия, осаждаемого из плазмы ВДР. При напряжении смещения 150 В наблюдается разделение кривых (в зависимости от материала основы), что, согласно работам [9, 16, 20–22], указывает на изменение фазового и элементного состава поверхностного слоя, приводящее к изменению скорости травления поверхности из-за различия коэффициентов катодного распыления обрабатываемых поверхностей сталей ЭП866 и ЭИ961.

В интервале значений напряжения смещения 350–400 В наблюдается инверсия скорости удельного изменения массы образцов, причем для стали ЭП866 напряжение смещения, при котором наблюдается инверсия, составляет 370 В, а для стали ЭИ961: 395 В. При этих значениях напряжения смещения скорость ионного травления поверхности образцов превышает скорость осаждения покрытия, что приводит к уменьшению их массы по сравнению с массой в исходном состоянии.

Сравнение этих результатов с данными, полученными в работах [19–22], показывает, что практически пропорциональное снижение плотности ионного тока из титановой плазмы на образцы при снижении тока вакуумной дуги в 2 раза не приводит к значительному изменению значений напряжения инверсии.

Из полученных результатов (рис. 2) следует, что ионную очистку образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 в титановой плазме ВДР с силой тока 300 А следует проводить при напряжениях смещения ≥ 360 и ≥ 390 В соответственно.

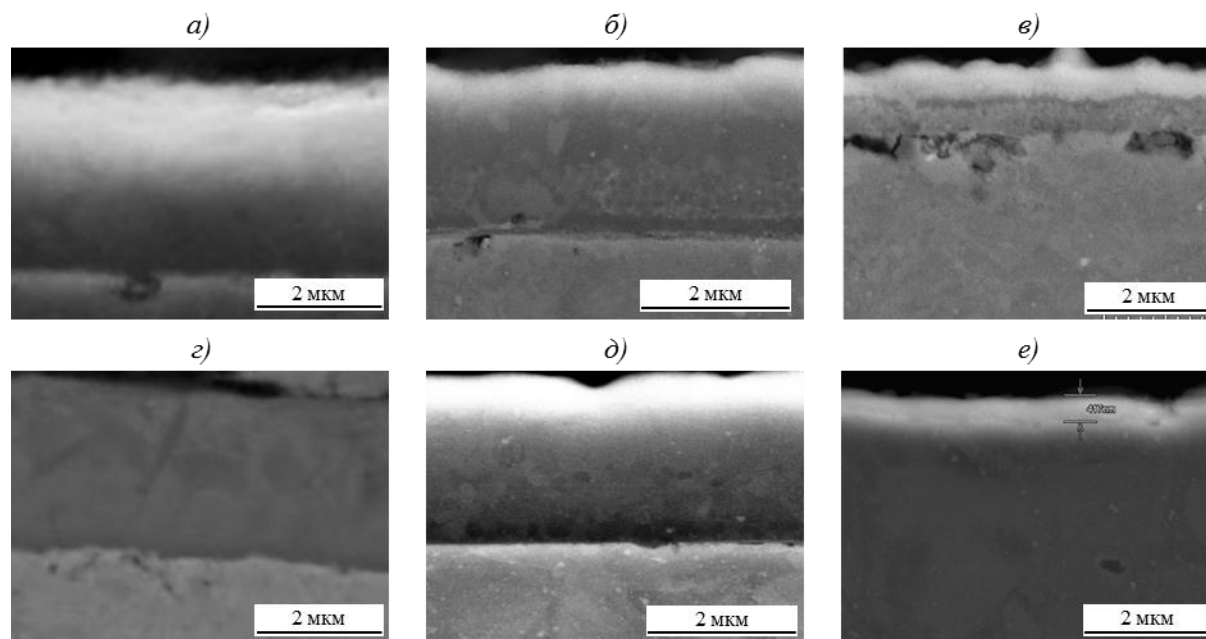


Рис. 3. Микроструктура образцов сталей ЭП866 (а, б, в) и ЭИ961 (з, д, е) после ионной обработки поверхности при токе дуги 300 А и значениях напряжения смещения 150, 300 и 400 В соответственно

На рис. 3 приведены микроструктуры поверхностного слоя образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961, обработанных ВДР при токе 300 А и значениях напряжения смещения 150; 300 и 400 В, с продолжительностью обработки 40 мин. Видно, что во время

обработки сталей ЭП866 и ЭИ961 с помощью ВДР при токе 300 А и соответствующем значении плотности тока ионов титана, на исследованных микрошлифах сталей, обработанных при напряжении смещения 150 и 300 В и температуре ионного нагрева до $\sim 400^\circ\text{C}$, видна граница раздела между конденсированным слоем и основой (рис. 3). На представленных шлифах отсутствуют значительные структурные изменения поверхностного слоя основы и покрытия после обработки по выбранным режимам. С ростом напряжения смещения ($U_{\text{см}}=400$ В) в структуре поверхностного слоя имеют место более заметные изменения. На поверхности образцов формируется модифицированный слой толщиной ~ 1 мкм – для стали ЭП866 и $\sim 0,4$ мкм – для стали ЭИ961, отсутствует граница раздела и наблюдается начало процесса структурного изменения основы глубиной до нескольких микрометров.

На микроструктуре поверхностного слоя на сталях ЭП866 (рис. 3, в) и ЭИ961 (рис. 3, е) при значении напряжения смещения $U_{\text{см}}=400$ В видно, что процесс модифицирования на стали ЭП866 протекает более интенсивно, чем на стали ЭИ961.

Эти изменения подтверждаются также результатами МРСА. Результаты определения элементного состава поверхностного слоя модифицированных образцов при значении тока вакуумной дуги 300 А на установке МАП-3 в интервале значений напряжения смещения от 300 до 400 В и постоянном времени обработки 40 мин приведены в табл. 1.

Таблица 1

Элементный состав поверхностного слоя образцов из сталей ЭИ961 и ЭП866 после ионно-плазменной обработки (300 А, 40 мин) при значениях напряжения смещения 300 и 400 В, полученный локальным МРСА

Материал основы	Напряжение смещения, В	Место анализа на шлифе	Содержание элементов, % (по массе)		
			Ti	Fe	Cr
ЭП866	300	Внешняя граница слоя	97,60	2,40	–
		Над границей слой–основа	91,23	7,68	1,09
		Под границей слоя	2,81	80,86	16,33
	400	Внешняя граница слоя	67,96	30,47	1,57
		Над границей слой–основа	55,87	39,18	3,80
		Под границей слоя	13,12	64,48	22,40
ЭИ961	300	Внешняя граница слоя	98,24	1,14	0,62
		Над границей слой–основа	98,48	1,52	–
		Под границей слоя	1,49	86,32	12,20
	400	Внешняя граница слоя	81,76	15,31	2,92
		Над границей слой–основа	0,79	86,38	12,83
		Под границей слоя	0,74	86,85	12,41

По результатам локального МРСА видно (табл. 1), что в процессе модифицирования с ростом напряжения смещения в слое снижается содержание титана и растет содержание железа и хрома независимо от характера слоя (конденсированный слой для сталей ЭП866 и ЭИ961 при $U_{\text{см}}=300$ В и поверхностный слой этих сталей при $U_{\text{см}}=400$ В).

Фазовый состав (табл. 2) поверхности обработанных в титановой плазме образцов исследуемых сталей в зависимости от напряжений смещения $U_{\text{см}}$ в исследованном диапазоне 150–400 В претерпевает изменения. Причем фазовый состав поверхностного слоя обработанных образцов стали ЭП866 изменяется в большей мере, чем у стали ЭИ961.

При напряжении смещения $U_{\text{см}}=150$ В основной фазой поверхностного слоя обработанных образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 является твердый раствор на основе α -Ti. При увеличении напряжения смещения до 300 В на образцах из сталей ЭП866 и ЭИ961 основной фазой также является α -Ti, одновременно с этим на стали ЭП866 наблюдаются следы фазы β -Ti.

Таблица 2

**Фазовый состав поверхностного слоя образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961
после модифицирования в плазме титана**

$U_{см}, В$	Результаты фазового анализа* сталей марок	
	ЭП866	ЭИ961
150	Основная фаза: α -Ti; фон подложки: α -Fe	Основная фаза: α -Ti; фон подложки: α -Fe
300	Основная фаза: α -Ti; фон подложки: α -Fe; следы фазы: β -Ti	Основная фаза: α -Ti; фон подложки: α -Fe
400	Основные фазы: FeTi; α -Ti; TiC, TiO; фон подложки: α -Fe; фазы слабой интенсивности: Fe ₂ Ti	Основная фаза: α -Ti; фон подложки: α -Fe; фазы слабой интенсивности: TiC и TiO

* Фазы расставлены в порядке убывания интенсивности.

При напряжении смещения 400 В на поверхности стали ЭП866 наблюдаются основные фазы FeTi; α -Ti; TiC, TiO и фаза слабой интенсивности Fe₂Ti. Для стали ЭИ961 при напряжении смещения 400 В основной фазой на поверхности остается фаза α -Ti. Отметим, что при модифицировании титаном стали ЭИ961, в диапазоне напряжений смещения $U_{см}=150-400$ В, фазовый состав обработанной поверхности практически не изменяется и основной фазой остается фаза α -Ti, соответствующая группе α -сплавов, к которой относится сплав марки ВТ1-0. Следовательно, в процессе модифицирования стали ЭИ961 при токе вакуумной дуги 300 А в интервале $U_{см}=150-400$ В преимущественно происходит конденсация покрытия из сплава ВТ1-0 практически без изменения его фазового состава.

Оценку коррозионной стойкости поверхности образцов, выполненных из компрессорных сталей марок ЭП866 и ЭИ961, модифицированных в титановой плазме ВДР при токе 300 А и напряжениях смещения 150; 300 и 400 В, осуществляли по методике ускоренных циклических испытаний, разработанной в ВИАМ. Испытания проводили при нагреве до температуры 600°C с выдержкой 1 ч, при охлаждении на воздухе в течение 2–3 мин, а затем в 3%-ном растворе NaCl с последующей выдержкой в камере влажности в течение 23 ч.

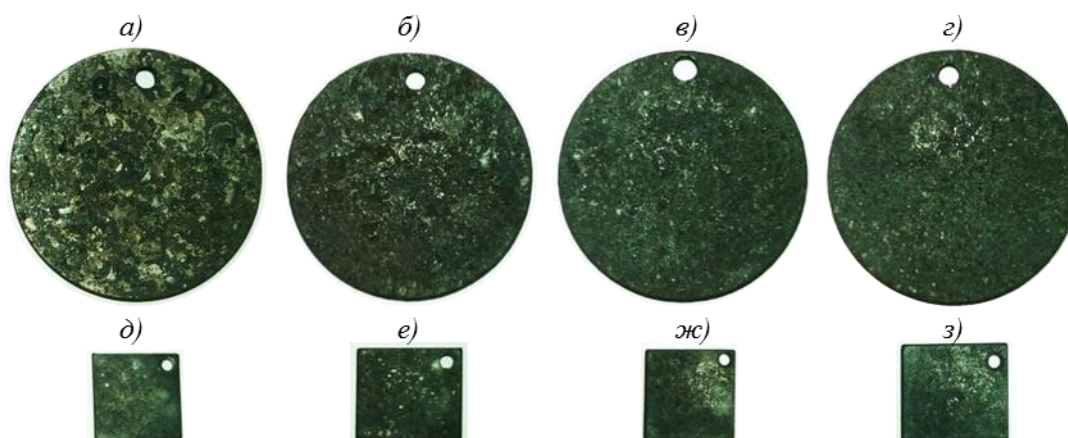


Рис. 4. Внешний вид модифицированных образцов из сталей ЭП866 (а, б, в, г) и ЭИ961 (д, е, ж, з) после 10 циклов испытаний на солевую коррозию по методике УЦКИ для материалов всеклиматического применения при температуре 600°C без ионной обработки (а, д) и с модифицированием по режимам в течение 40 мин при токе дуги 300 А и значениях напряжения смещения 150 (б, е), 300 (в, ж) и 400 В (г, з)

Стойкость к солевой коррозии оценивали гравиметрическим методом по удельному изменению массы обработанных образцов и по результатам внешнего осмотра. Внешний вид модифицированных образцов после проведения 10 циклов УЦКИ приведен на рис. 4. Зависимости удельного изменения массы образцов без обработки и модифицированных образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 после 10 циклов испытаний на УЦКИ при температуре 600°C приведены на рис. 5.

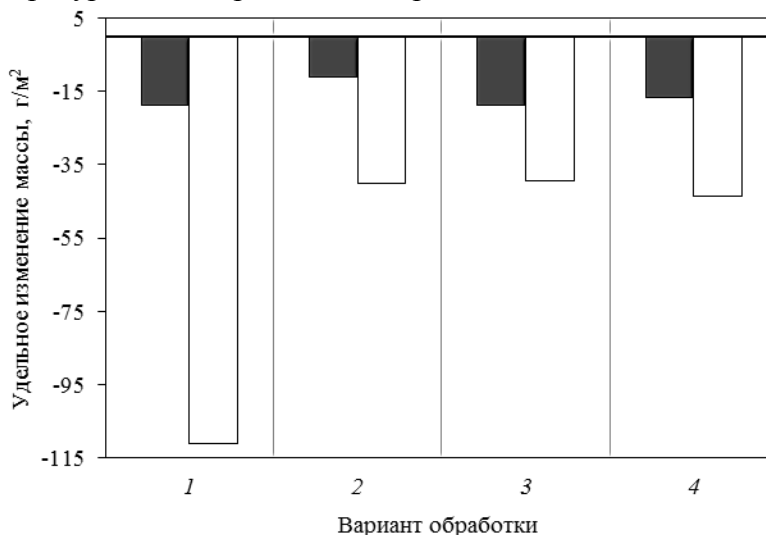


Рис. 5. Зависимость удельного изменения массы после 10 циклов испытаний по методике УЦКИ при температуре 600°C образцов из сталей ЭИ961 (□) и ЭП866 (■) в исходном состоянии без ионной обработки (1) и модифицированных в плазме титана в течение 40 мин при токе дуги 300 А и значениях напряжения смещения 150 (2), 300 (3) и 400 В (4)

При визуальном осмотре образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 как без обработки, так и с обработкой при токе вакуумной дуги 300 А и напряжении смещения 150; 300 и 400 В после проведения УЦКИ, на всех испытуемых образцах по рабочей поверхности наблюдается сплошное коррозионное поражение. При наблюдении в оптический бинокляр на поверхности всех образцов наблюдаются аналогичные коррозионные повреждения с образованием рыхлых зон, отшелушивания отдельных участков и проявления точечной (питинговой) коррозии. Результаты визуального наблюдения показывают, что подобранные режимы модифицирования поверхности образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 при напряжении смещения 150; 300 и 400 В и токе ВДР 300 А не обеспечивают стойкость к солевой коррозии при температуре 600°C и их поверхностное состояние не пригодно для всеклиматического применения. Этот вывод подтверждается результатами гравиметрического контроля (рис. 5).

Изменение удельной массы модифицированных образцов после окончания испытаний на солевую коррозию составило в зависимости от исходного состояния и параметров обработки: для сплава ЭП866 – от -11 до -18 г/м², а для сплава ЭИ961 – от -39 до -111 г/м².

Следует отметить, что по отношению к исходному состоянию стали ЭП866 модифицированные слои с получением как однофазового состава α -Ti в процессе обработки при 150 и 300 В, так и с получением многофазового состава FeTi, α -Ti, TiC, TiO в процессе обработки при 400 В, не повышают стойкость к солевой коррозии, при которой убыль массы образцов практически одинакова и составляет в среднем -18 г/м². Однако по отношению к стали ЭИ961 без обработки модифицированные слои образцов той же стали с основной фазой поверхностного слоя α -Ti дают значительные результаты

по коррозионной стойкости – убыль массы изменилась с -111 до -40 г/м² (в среднем по модифицированным образцам), что указывает на повышение коррозионной стойкости этой стали.

Данные гравиметрического контроля подтверждают основной вывод визуального описания состояния поверхности – модифицированная поверхность образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 (при напряжении смещения 150; 300 и 400 В и токе ВДР 300 А) не обеспечивает коррозионную стойкость этих сталей, поэтому такие стали не пригодны для использования во всеклиматических условиях.

Более подробные исследования коррозионного разрушения поверхностного слоя обработанных образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961, модифицированных в титановой плазме ВДР при токе дуги 300 А и напряжении смещения 150; 300 и 400 В, следует проводить на металлографических шлифах испытанных образцов после УЦКИ с получением данных об изменении элементного и фазового состава.

Обсуждение и заключения

Проведены исследования экспериментального процесса модифицирования поверхности образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 в титановой плазме ВДР установки МАП-3 при токе вакуумной дуги 300 А и значениях напряжения смещения 150; 300 и 400 В. Показано, что температура нагрева образцов из сталей ЭИ961 и ЭП866 при модифицировании изменяется в пределах от 340 до 440°С, т. е. ниже температуры их отпуска – соответственно 630 и 650°С.

Процесс модифицирования образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 в титановой плазме при низких значениях тока ВДР и напряжении смещения от 150 до 400 В приводит к изменениям элементного и фазового состава их поверхностного слоя. При анализе результатов гравиметрического контроля модифицированных образцов определены напряжения инверсии 360 и 390 В для сталей ЭП866 и ЭИ961 при токе ВДР 300 А, характеризующие переход от процесса конденсации титана к процессу ионного травления и насыщения их поверхностности.

Основные фазовые изменения поверхности стали ЭП866 при модифицировании в плазме титана и токе ВДР 300 А начинают проходить при напряжении смещения 400 В и температуре ~ 440 °С, при которых модифицированный слой состоит в основном из фаз: FeTi, α -Ti, TiC, TiO.

При модифицировании поверхности образцов из стали ЭИ961 в плазме титана ВДР (в диапазоне изменения напряжения смещения – от 150 до 400 В), фазовый состав обработанной поверхности практически не изменяется и состоит в основном из твердого раствора α -Ti.

Из полученных результатов видно, что интенсивное модифицирование поверхности конструкционных сталей при токе ВДР 300 А возможно при напряжении смещения >400 В и, соответственно, при более высоких температурах подложки.

Несмотря на полученные результаты стойкости к солевой коррозии поверхности сталей ЭП866 и ЭИ961 при модифицировании титаном в плазме ВДР, этот процесс перспективен и имеет широкие технологические возможности. Дальнейшую работу целесообразно продолжить в направлении выбора тока ВДР в диапазоне 350–600 А, при котором модифицирование поверхности конструкционных сталей возможно с высокими скоростями при температуре подложки ниже температуры отпуска этих сталей, с возможностью осаждения тонкого слоя покрытий (до 2–3 мкм) как до, так и после проведения модифицирования поверхностного слоя металлической подложки.

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., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 36–52.
3. Kablov E.N., Petrushin N.V., Sidorov V.V. Rhenium in the thermally stable nickel alloys for single-crystal blades of gas-turbine engines // *7th international symposium on technetium and rhenium science and utilization*. 2011.
4. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок // *Крылья Родины*. 2010. №4. С. 31–33.
5. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
6. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys // *Metal Science and Heat Treatment*. 1995. №2. С. 15–18.
7. 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.
8. 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.
9. Мубояджян С.А. Перспективные покрытия для деталей авиадвигателей // *Военный парад*. 2009. №1 (91). С. 33–34.
10. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №1. С. 17–20.
11. 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.
12. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising GTES // *Russian metallurgy (Metally)*. 2012. No. 1. P. 1–7.
13. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Ионное травление и модифицирование поверхности ответственных деталей машин в вакуумно-дуговой плазме // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*, 2011. №SP2. С. 149–163.
14. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N., Budinovskiy S.A., Pomelov Ya.A. Equipment, technology and protective coatings produced by ion bombardment deposition // *Surface and Coating Technology* 91. 1997. P. 13–19.
15. Помелов Я.А., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности конструкционных материалов методом ионной обработки в плазме вакуумного дугового разряда // *Авиационные материалы и технологии*. 2003. №3. С. 85–94.
16. Мубояджян С.А. Современные вакуумные процессы ионной обработки поверхности // *Конверсия в машиностроении*. 2004. №4. С. 69–77.
17. Мубояджян С.А. Особенности осаждения из двухфазного потока многокомпонентной плазмы вакуумно-дугового разряда, содержащего микрокапли испаряемого материала // *Металлы*. 2008. №2. С. 20–34.
18. Мубояджян С.А. Модифицирование металлической поверхности в плазме вакуумно-дугового разряда методом термостимулированной ионной диффузии // *Металлы*. 2008. №6. С. 1–13.
19. Азаровский Е.Н., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности деталей из конструкционных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана. Часть I // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 20–25.
20. Азаровский Е.Н., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности деталей из конструкционных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана. Часть II // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №1. С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-3-11.

21. Азаровский Е.Н., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности деталей из конструкционных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана. Часть III //Авиационные материалы и технологии. 2015. №4 (37). С. 29–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-29-37.
22. Мубояджян С.А., Азаровский Е.Н. Исследование нового процесса ионного модифицирования поверхности образцов компрессорных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана // Металлы. 2013. №6. С. 63–73.
23. Мубояджян С.А., Азаровский Е.Н. Модифицирование поверхности образцов из компрессорных сталей методом термостимулированной ионной диффузии в титановой плазме вакуумно-дугового разряда // Металлы. 2015. №6. С. 11–19.
24. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №1. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.11.2016).