

УДК 669.14.018.8

*Е.Н. Азаровский¹, С.А. Мубояджян¹***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОДИФИЦИРОВАНИЯ
СТАЛЕЙ ЭП866 И ЭИ961 В ТИТАНОВОЙ ПЛАЗМЕ ВДР
С ИСПЫТАНИЯМИ НА СТОЙКОСТЬ К СОЛЕВОЙ КОРРОЗИИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-11-11

Рассмотрен процесс модифицирования поверхности в ионно-плазменной установке МАП-3. Показано, что при выбранных параметрах процесса модифицирования температура образцов не превышает температуру отпуска компрессорных сталей ЭП866 и ЭИ961. Проведены металлографические и микрорентгеноспектральные исследования поверхностного слоя образцов после модифицирования. Проведены испытания модифицированных образцов на стойкость к солевой коррозии по методике ВИАМ при температуре 600°C.

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

*Е.Н. Azarovskiy¹, S.A. Muboyadzhyan¹***INVESTIGATION OF THE PROCESS OF MODIFICATION
OF STEELS EP866 AND EI961 IN TITANIUM PLASMA VDR
WITH TESTS ON RESISTANCE TO SALT CORROSION**

The process of surface modification in the ion-plasma installation MAP-3 is considered. It is shown that with the chosen parameters of the modification process, the temperature of the samples does not exceed the tempering temperature of the compressor steels EP866 and EI961. Metallographic and microspectral studies of the surface layer of the samples after modification have been carried out. Modified samples were tested for resistance to salt corrosion by the VIAM method at a temperature of 600°C.

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

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

Современные требования по увеличению ресурса газотурбинных двигателей (ГТД), эксплуатируемых в условиях всеклиматического применения, требуют проведения работ по повышению коррозионной стойкости материалов, используемых для изготовления ответственных деталей компрессора. При производстве деталей компрессора ГТД используются конструкционные стали ЭП866 и ЭИ961, которые обладают высокой коррозионной стойкостью в условиях общеклиматического применения [1–3]. Однако эксплуатация деталей компрессора, выполненных из этих сталей, установленных в ГТД самолетов морского базирования, показала неудовлетворительную стойкость рассматриваемых сталей к солевой коррозии. В авиационной промышленности, для решения

задач по повышению коррозионной стойкости стальных деталей компрессора, используют процессы ионно-плазменного нанесения защитных покрытий [4–7]. Защитные покрытия наносят с помощью ионно-плазменных установок (ИПУ) типа МАП (МАП-1, МАП-2, МАП-3), разработанных в ВИАМ [8–11]. В ВИАМ разработана также технология модифицирования поверхности в плазме сильноточного вакуумно-дугового разряда (ВДР) методом термостимулированной ионной диффузии [12, 13]. В работах [14–19] показана перспективность этой технологии, которая позволяет изменять структурно-фазовое состояние и эксплуатационные свойства поверхности обрабатываемых сталей.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные покрытия» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [20].

Материалы и методы

Ионно-плазменную обработку поверхности образцов, выполненных из сталей ЭП866 и ЭИ961, проводили на плоских прямоугольных образцах с размерами сторон 15 и 13 мм при толщине 1,5 мм и на дисковых образцах $\varnothing 30$ мм толщиной 3 мм. В качестве материала модификатора использовали титан марки ВТ1-0, из которого изготавливали трубный катод для промышленных ионно-плазменных установок типа МАП. Перед проведением процесса модифицирования поверхность образцов опескоструивали электрокорундом, с последующей промывкой в ультразвуковой ванне для удаления остатков твердых частиц абразивного материала. Финишную очистку исследуемых образцов проводили бомбардировкой их поверхности ионами титана в плазме вакуумно-дугового разряда по заданным параметрам установки МАП-3.

Процесс ионно-плазменного модифицирования компрессорных сталей ЭП866 и ЭИ961 в титановой плазме вакуумно-дугового разряда проводили по трем режимам обработки:

– *режим 1* – ионно-плазменное модифицирование поверхности в титановой плазме ВДР (далее – Ti^+);

– *режим 2* – модифицирование в титановой плазме ВДР с внешним титановым покрытием (далее – Ti^+Ti);

– *режим 3* – нанесение тонкого слоя титанового покрытия (несколько мкм) с последующим модифицированием в титановой плазме ВДР и финишным нанесением титанового покрытия (далее – $Ti+Ti^++Ti$). С целью получения 100%-ного плотного покрытия на поверхности образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 после проведения процесса модифицирования и нанесения покрытия на основе титана, на поверхность части образцов шликерным методом наносили силикатный слой на основе водного раствора метасиликата натрия (Na_2SiO_3).

Процессы модифицирования поверхности образцов ионами титана в ВДР проводили при постоянном значении тока вакуумно-дугового разряда 450 А и напряжении смещения 400 В с продолжительностью не более 60 мин. Нанесение ионно-плазменного титанового покрытия ВТ1-0 на поверхность образцов проводили по стандартной технологии, разработанной в ВИАМ. При проведении процессов ионно-плазменной обработки фиксировали показания контрольной термопары ИПУ МАП-3. Внешний силикатный слой наносили путем погружения образцов в 5%-ный раствор Na_2SiO_3 с последующим отжигом на воздухе при температуре 600°C в течение 20 мин.

На всех этапах обработки образцов проводили гравиметрический контроль взвешиванием на аналитических весах фирмы OHAUS с точностью 10^{-4} г.

Металлографию и исследование локального химического состава модифицированной поверхности проводили на сканирующем растровом электронном микроскопе (РЭМ) Inspect F50 фирмы FEI (США) с использованием энергодисперсионного анализатора (EDS/ЭДА).

Сравнительные испытания образцов на солевую коррозионную стойкость проводили по методике ускоренных циклических коррозионных испытаний (УЦКИ) в соответствии с РТМ 1.2.189.

Результаты

В работах [14, 15] показано, что процесс ионного модифицирования позволяет получать поверхностные слои глубиной до 40 мкм, однако при параметрах процесса ионно-плазменной обработки в этих работах (ток дуги 600 А, напряжение смещения 400 В) температура поверхности образцов составляла $\sim 765^{\circ}\text{C}$, что превышает температуру отпуска рассматриваемых сталей. По результатам работ [14, 15] показано, что процесс модифицирования поверхности конструкционных сталей ЭП866 и ЭИ961 следует проводить при токах вакуумно-дугового разряда 300–450 А в области рабочих температур этих сталей.

Обработка в титановой плазме ВДР при токе дуги 450 А проводится при температурах ниже температуры отпуска исследуемых сталей. Данные контрольной термопары установки МАП-3, фиксируемые во время проведения процесса модифицирования поверхности сталей, показали, что в течение 60 мин температура не превышала 470°C . Показания термопары установки МАП-3, находящейся под потенциалом смещения, отличаются от температуры поверхности обрабатываемого изделия [14, 15]. С учетом разницы экспериментальных значений температуры на образцах и на термопаре установки МАП-3, на рис. 1 представлены сравнительные графики изменения температуры поверхности образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 при проведении процесса модифицирования в титановой плазме ВДР для значений токов вакуумной дуги 300, 450, 500 и 600 А и постоянном значении напряжения смещения (400 В).

Данные на рис. 1 показывают, что температура поверхности образцов в установке МАП-3 при токе дуги 450 А и постоянном напряжении смещения 400 В не превышает температуру отпуска обрабатываемых материалов и достигает значений $515\text{--}530^{\circ}\text{C}$.

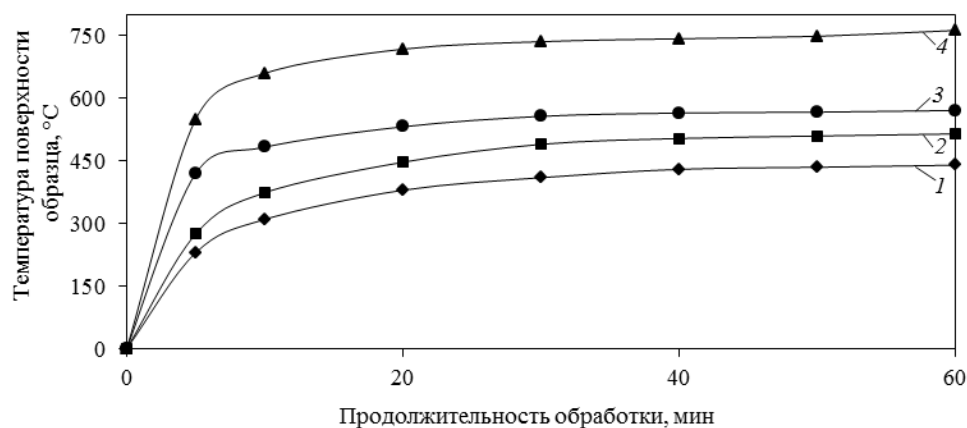


Рис. 1. Зависимость изменения температуры поверхности образцов из сталей ЭП866 и ЭИ962 в камере напыления ионно-плазменной установки МАП-3 от продолжительности процесса модифицирования при постоянном значении напряжения смещения (400 В) и заданных значениях тока ВДР: 300 (1), 450 (2), 500 (3) и 600 А (4)

Гравиметрический контроль образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961, модифицированных в титановой плазме ВДР при токе 450 А и напряжении смещения 400 В, показал, что скорость удельного изменения массы исследуемых сталей одинакова и составляет приблизительно $-0,202 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$. На рис. 2 представлен сравнительный график

скорости удельного изменения массы образцов в зависимости от значения тока ВДР (300, 450, и 600 А) при постоянном значении напряжения смещения.

Как следует из данных рис. 2, при ионном модифицировании на поверхности образцов происходит процесс катодного распыления (ионного травления подложки) со скоростью меньше, чем скорость модифицирования. На рис. 3 представлен внешний вид образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 соответственно до и после ионно-плазменной обработки в титановой плазме ВДР и с нанесенным внешним силикатным слоем.

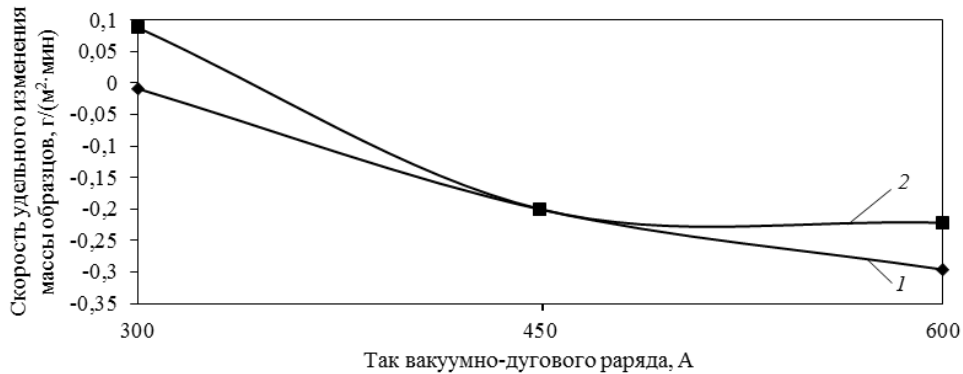


Рис. 2. Зависимость скорости удельного изменения массы модифицированных образцов из сталей ЭП866 (1) и ЭИ961 (2) при ионной обработке от значения тока вакуумно-дугового разряда при постоянном значении напряжения смещения 400 В

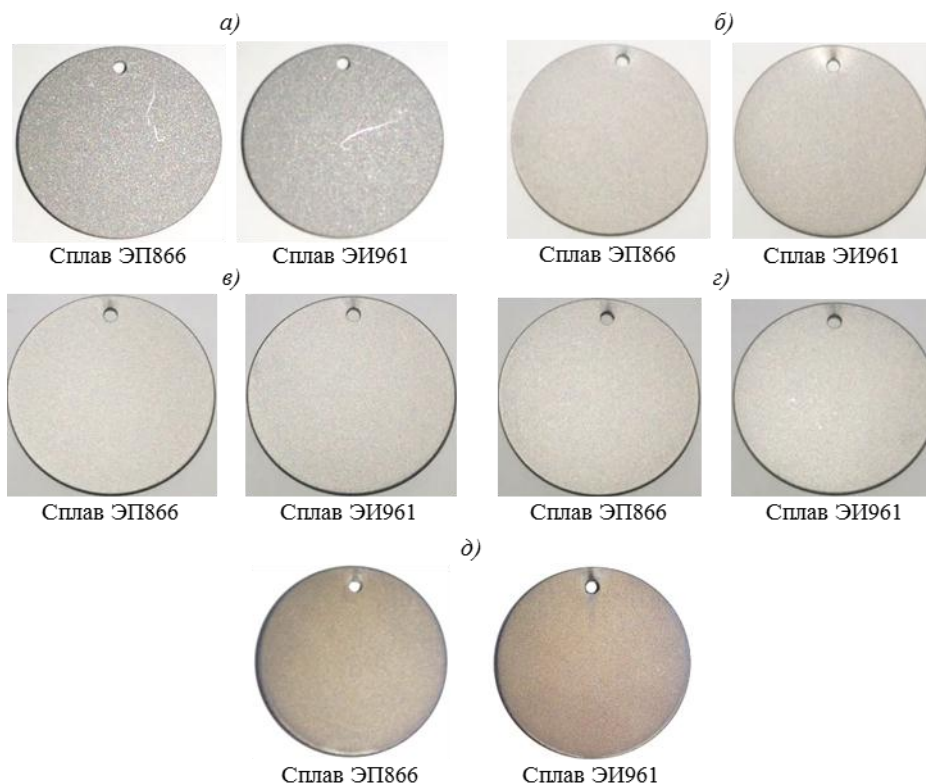


Рис. 3. Внешний вид образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 до (а) и после ионно-плазменной обработки:

б – модифицированных в титановой плазме ВДР (Ti^+); в – то же + нанесение ионно-плазменного титанового покрытия ($Ti^+ + Ti$); г – покрытых тонким слоем титанового покрытия с последующим модифицированием в титановой плазме ВДР и нанесением титанового покрытия ($Ti + Ti^+ + Ti$); д – с модифицированной поверхностью и внешним шликерным силикатным покрытием.

На рис. 4 представлены микроструктуры образцов исследуемых сталей ЭП866 и ЭИ961 после проведения ионно-плазменной обработки в титановой плазме ВДР. Микроструктуры исследуемых материалов получены на растровом электронном микроскопе при увеличении $\times 5000$ – 6000 .

На представленных микроструктурах образцов исследуемых сталей ЭП866 и ЭИ961 видно, что в процессе модифицирования в титановой плазме ВДР на обработанной поверхности (рис. 4, *а*, *б*) произошли значительные структурные изменения с образованием однородного по структуре слоя со средней толщиной ~ 9 мкм. Между модифицированным слоем и материалом основы отсутствует четкая граница раздела. Формирование конденсированного титанового покрытия исключено, так как, согласно данным работ [14, 15] и представленным на рис. 2 результатам, установлено, что на поверхности образцов, наряду с модифицированием поверхности, протекают процессы катодного распыления. На всех микроструктурах образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 под модифицированным слоем видна зона с измененной структурой, глубина которой достигает 50 мкм. В зоне с измененной структурой наблюдается образование новых более или менее темных серых фаз с размерами до нескольких мкм, с содержанием титана – до 15% (данные МРСА).

Исследование микрошлифов образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961, обработанных по режиму 3 (рис. 4, *в*), показало, что модифицирования основы в титановой плазме ВДР при токе дуги 450 А и напряжении смещения 400 В через прослойку титана толщиной 3 мкм не происходит. На образцах наблюдается граница раздела между внутренним титановым слоем и материалом основы. Внутреннее титановое покрытие после ионной «бомбардировки» имеет большую толщину (до 6 мкм), с внешним глобулярным слоем с размерами отдельных глобул до 6 мкм и светлыми прожилками и фазами, содержащими до 6% железа и по $\sim 1\%$ кобальта и вольфрама. Такое строение внутреннего слоя можно объяснить коэффициентом катодного самораспыления титана < 1 при напряжении смещения 400 В и осаждением титана, а наличие светлых фаз – диффузией элементов из основы в титановый слой.

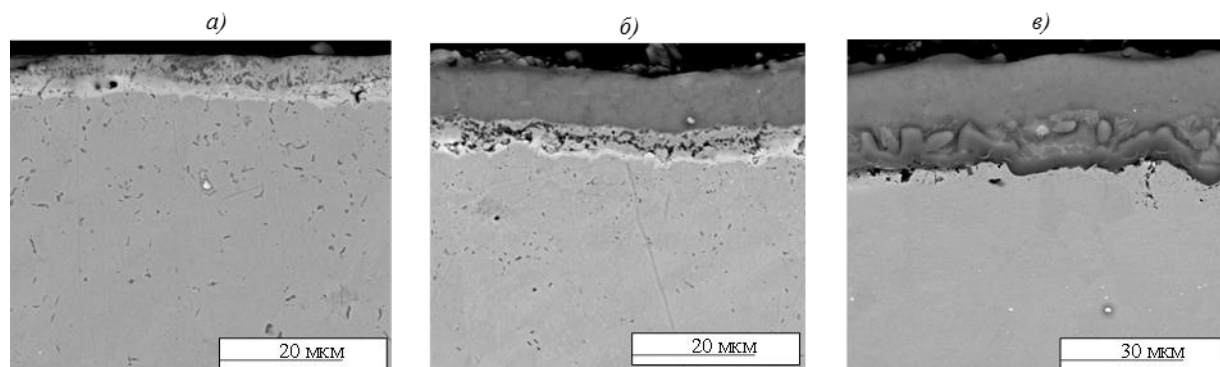


Рис. 4. Микроструктуры поверхности образцов из сталей ЭП866 (*а*, *в*) и ЭИ961 (*б*) после ионно-плазменной обработки на установке МАП-3:

а – модифицированного в титановой плазме ВДР (Ti^+); *б* – то же + нанесение внешнего ионно-плазменного титанового покрытия ($Ti^+ + Ti$); *в* – с внутренним тонким слоем титанового покрытия с последующим модифицированием в титановой плазме ВДР и нанесением внешнего титанового покрытия ($Ti + Ti^+ + Ti$)

В табл. 1–3 представлены результаты определения элементного состава обработанной поверхности образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961.

Таблица 1

**Элементный состав модифицированных образцов из стали ЭП866 (основа)
после ионно-плазменной обработки*, полученный локальным МРСА**

Место анализа на шлифе	Содержание основных элементов, % (по массе)					
	Ti	Fe	Cr	Co	Ni	W
Ближе к верхней границе модифицированного слоя	65,97	11,53	0,83	1,52	0,52	0,66
На границе с основой	13,90	54,83	12,09	3,50	0,48	2,20
Под границей «модифицированный слой–материал основы»	2,10	66,73	15,59	3,41	0,54	1,02
Состав более темной фазы на глубине 20 мкм от границы «модифицированный слой–материал основы»	9,20	60,61	14,12	3,57	0,82	1,26
Состав серой фазы на глубине 20 мкм от границы «модифицированный слой–материал основы»	1,30	69,48	14,49	4,15	0,99	1,00
Состав более темной фазы на глубине 40 мкм от границы «модифицированный слой–материал основы»	2,95	67,43	13,89	4,21	1,11	1,01
Состав серой фазы на глубине 40 мкм от границы «модифицированный слой–материал основы»	0,80	69,08	13,88	4,55	1,37	1,64

* По режиму 1 – модифицирование стали в титановой плазме (Ti⁺) вакуумно-дугового разряда по заданным параметрам процесса в течение 60 мин.

Таблица 2

**Элементный состав модифицированных образцов из стали ЭИ961 (основа)
после ионно-плазменной обработки*, полученный локальным МРСА**

Место анализа на шлифе	Содержание основных элементов, % (по массе)				
	Ti	Fe	Cr	Ni	W
Ближе к верхней границе модифицированного слоя	48,75	39,83	1,32	1,36	0,54
На границе с основой	24,77	57,9	5,41	0,70	1,80
Под границей «модифицированный слой–материал основы»	3,16	75,4	10,74	0,65	1,57
Состав более темной фазы на глубине 20 мкм от границы «модифицированный слой–материал основы»	14,4	62,7	10,1	0,69	1,45
Состав серой фазы на глубине 20 мкм от границы «модифицированный слой–материал основы»	2,37	75,1	10,5	0,98	2,08
Состав более темной фазы на глубине 40 мкм от границы «модифицированный слой–материал основы»	11,6	66,2	9,96	1,23	1,88
Состав серой фазы на глубине 40 мкм от границы «модифицированный слой–материал основы»	0,94	77,5	9,79	1,29	1,34

* По режиму 2 – модифицирование стали в титановой плазме вакуумно-дугового разряда в течение 60 мин с последующим нанесением слоя титанового покрытия (Ti⁺+Ti) толщиной до 10 мкм.

Таблица 3

Элементный состав модифицированных образцов из стали ЭП866 (основа) после ионно-плазменной обработки*, полученный локальным МРСА

Место анализа на шлифе	Содержание основных элементов, % (по массе)					
	Ti	Fe	Cr	Co	Ni	W
Ближе к верхней границе модифицированного слоя	100	–	–	–	–	–
На границе с основой	85,9	6,19	–	0,83	–	0,97
Под границей «модифицированный слой–материал основы»	1,25	68,7	14,22	4,37	1,11	1,00

* По режиму 3 – нанесение тонкого слоя титанового покрытия толщиной до 3 мкм с последующим модифицированием в титановой плазме вакуумно-дугового разряда в течение 60 мин и нанесением внешнего ионно-плазменного титанового покрытия (Ti+Ti⁺+Ti) толщиной до 10 мкм.

Результаты локального МРСА (табл. 1) показывают, что после проведения процесса модифицирования в титановой плазме ВДР (режим 1) содержание титана на внешней поверхности стали ЭП866 составляет ~66% (по массе), над границей раздела «модифицированный слой–материал основы» – до 14% (по массе). В более темных серых фазах содержание титана изменяется от 9,20% (по массе) в поверхностном слое до 2,95% (по массе) в зоне окончания структурного изменения материала основы. На образце из стали ЭП866, обработанном по режиму 3, покрытие содержит 100% титана (без учета углерода). На нижней границе внешнего слоя покрытия содержание титана составляет 85,9% (по массе), под границей модифицированного слоя с материалом основы содержание титана составляет 1,25% (по массе).

На образце из стали ЭИ961, обработанном по режиму 2, вблизи внешней границы модифицированного слоя содержание титана не превышает 48,75% (по массе) и снижается до 24,77% (по массе) ближе к границе с материалом основы. В зоне взаимодействия этого же образца содержание титана снижается с 3,16% (по массе) у поверхности раздела до 0,94% (по массе) на глубине 40 мкм.

Оценку коррозионной стойкости поверхности образцов, выполненных из компрессорных сталей марок ЭП866 и ЭИ961, обработанных в титановой плазме ВДР при токе 450 А по режимам 1–3, проводили по методике ускоренных циклических испытаний, разработанной в ВИАМ. Испытания образцов проводили при их нагреве до температуры 600°С в атмосферной электропечи с выдержкой 60 мин, дальнейшей выгрузкой и охлаждением на воздухе в течение 2–3 мин, обрызгиванием из пульверизатора 3%-ным раствором NaCl с последующей выдержкой в камере влажности в течение 23 ч при температуре окружающей среды.

На рис. 5 и 6 приведен внешний вид образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 после десяти циклов ускоренных испытаний на стойкость к солевой коррозии при температуре 600°С (приведены фотографии сторон образцов с большей степенью коррозионного повреждения).

При рассмотрении поверхности образцов с помощью оптического бинокля наблюдаются коррозионные повреждения в виде рыхлых зон, отшелушивания отдельных участков и проявления точечной коррозии. Поверхность образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 в исходном состоянии (без ионно-плазменной обработки) имеет сплошное коррозионное поражение по всей поверхности образца. На образцах из сталей ЭП866 и ЭИ961, обработанных по режиму 1 (рис. 5, б и 6, б) наблюдаются поражения в виде точечной коррозии и отшелушивания отдельных участков, однако на большей части поверхности образцов сохранились участки с неповрежденным модифицированным слоем – без признаков коррозионного поражения. Дополнительное нанесение внешнего силикатного слоя на поверхности модифицированных образцов (режимы 1–3) исследуемых сталей дает заметный эффект защиты от солевой коррозии по сравнению с исходным

состоянием. По результатам визуального анализа образцы из сталей ЭП866 и ЭИ961 в исходном состоянии имеют неудовлетворительную стойкость к солевой коррозии при температуре 600°C.

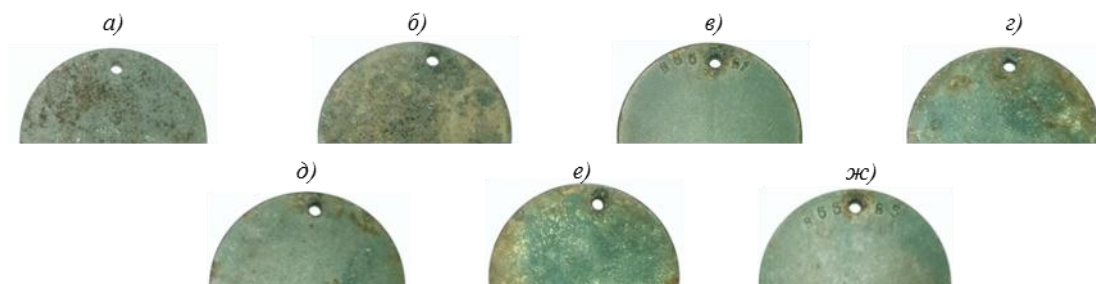


Рис. 5. Внешний вид образцов из стали ЭП866 без обработки (а) и после ионно-плазменной обработки поверхности с модифицированием в титановой плазме вакуумно-дугового разряда Ti^+ (б), Ti^+Ti (в) и $Ti+Ti^++Ti$ (е) с нанесением внешнего силикатного слоя (Na_2SiO_3) после обработки по режимам 1 (е), 2 (д) и 3 (ж), а также проведения 10 циклов испытаний УЦКИ при температуре 600°C

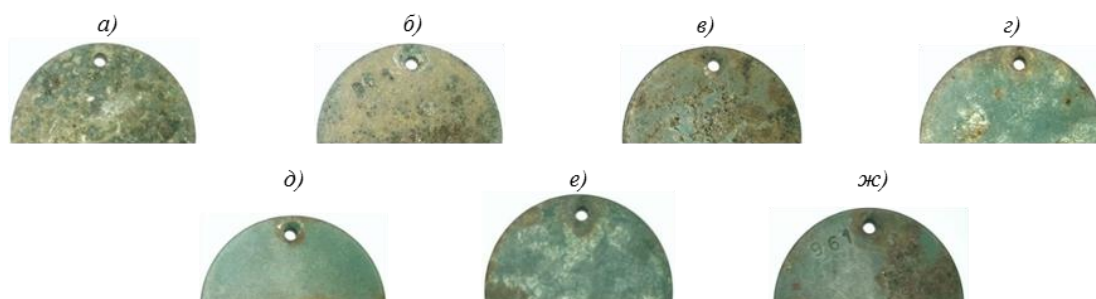


Рис. 6. Внешний вид образцов из стали ЭИ961 без обработки (а) и после ионно-плазменной обработки поверхности с модифицированием в титановой плазме вакуумно-дугового разряда Ti^+ (б), Ti^+Ti (в) и $Ti+Ti^++Ti$ (е) с нанесением внешнего силикатного слоя (Na_2SiO_3) после обработки по режимам 1 (е), 2 (д) и 3 (ж), а также проведения 10 циклов испытаний УЦКИ при температуре 600°C

На рис. 7 приведена гистограмма зависимости удельного изменения массы образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 после 10 циклов ускоренных коррозионных испытаний при температуре 600°C по методике УЦКИ.

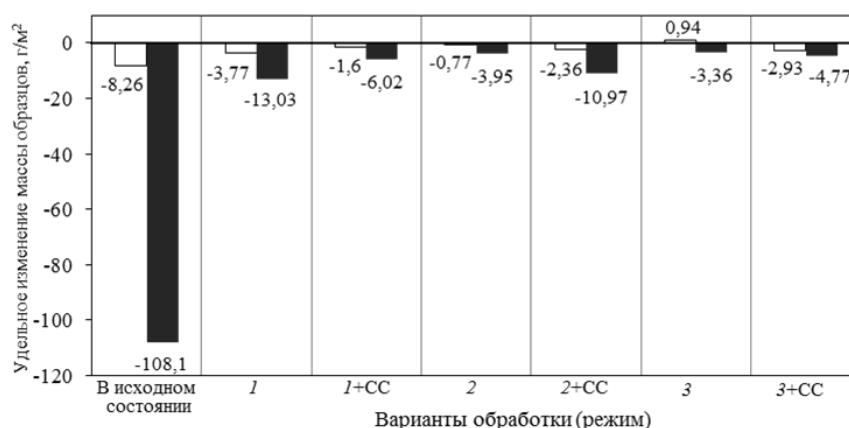


Рис. 7. Гистограмма зависимости удельного изменения массы образцов из сталей ЭП866 (□) и ЭИ961 (■) после 10 циклов испытаний по методике УЦКИ при температуре 600°C, обработанных по режимам 1–3 без силикатного слоя и с силикатным слоем (CC)

Сравнительный анализ коррозионной стойкости образцов без обработки и с обработкой по режимам 1–3 показывает:

– для стали ЭИ961 наблюдается значительное повышение коррозионной стойкости модифицированных образцов, полученных по режиму 1–3; наиболее высокие защитные свойства, по данным гравиметрического анализа, имеют образцы, обработанные по режиму 3;

– для стали ЭП866 модифицирование по режимам 1–3 позволяет повысить стойкость к солевой коррозии; более высокие защитные свойства имеют образцы, обработанные по режиму 3.

По результатам визуального и гравиметрического контроля показано, что режимы модифицирования 1–3 поверхности сталей ЭП866 и ЭИ961 в титановой плазме ВДР повышают стойкость к солевой коррозии при температуре 600°C при циклических испытаниях. Наиболее высокие защитные свойства имеют образцы, обработанные по режиму 3.

Обсуждение и заключения

В данной работе проведены исследования процессов ионно-плазменной обработки поверхности сталей ЭП866 и ЭИ961 в титановой плазме ВДР при токе вакуумной дуги 450 А и напряжении смещения 400 В. Модифицирование проводили при температуре образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 ниже температуры их отпуска. На микроструктурах показано, что в процессе проведения модифицирования на поверхности сталей образуются модифицированные слои глубиной до 9 мкм и зона с измененной микроструктурой глубиной до 50 мкм. Внешнее конденсированное ионно-плазменное титановое покрытие равномерно по толщине и составляет 9 мкм, внешний шликерный силикатный слой имеет толщину ~1 мкм.

По результатам визуального контроля образцов после проведения 10 циклов УЦКИ показано, что образцы из сталей ЭП866 и ЭИ961 в исходном состоянии имеют неудовлетворительную стойкость к солевой коррозии при температуре 600°C. По результатам гравиметрического контроля образцов, прошедших испытания УЦКИ, модифицирование поверхности образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 в титановой плазме ВДР повышает стойкость к солевой коррозии при температуре испытания 600°C. Образцы, обработанные по режиму 3, показали наиболее высокую стойкость к солевой коррозии как на стали ЭП866, так и на стали ЭИ961.

Процесс модифицирования поверхности сталей ЭП866 и ЭИ961 перспективен и имеет широкие технологические возможности. Дальнейшую работу целесообразно продолжить в направлении выбора материала модификатора, последовательности проведения процессов конденсации и модифицирования поверхности с целью дальнейшего повышения стойкости к солевой коррозии при температуре испытания 600°C.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок // Крылья Родины. 2010. №4. С. 31–33.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 36–52.
4. Салахова Р.К. Коррозионная стойкость стали 30ХГСА с «трехвалентным» хромовым покрытием в естественных и искусственных средах // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 59–66.

5. Анфиногенов А.И. Анализ развития химико-термической обработки металлов и сплавов // Расплавы. 2005. №3. С. 40–52.
6. Кашин Д.С., Стехов П.А. Разработка комплексных жаростойких покрытий для деталей из естественно-композиционного материала на основе ниобия // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №6 (54). Ст. 4. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.12.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-4-4.
7. 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.
8. Способ обработки поверхности металлического изделия: пат. 2368701 Рос. Федерация; опубл. 27.09.2009.
9. Способ нанесения комбинированного жаростойкого покрытия: пат. 2402633 Рос. Федерация; опубл. 27.10.2010.
10. Александров Д.А., Артеменко Н.И. Износостойкие покрытия для защиты деталей трения современных ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №10 (46). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-6-6.
11. Артеменко Н.И., Симонов В.Н. Математическое моделирование процесса осаждения титана на установке ионно-плазменного напыления МАП-3 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №6 (54). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.12.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-3-3.
12. Мубояджян С.А. Модифицирование металлической поверхности в плазме вакуумно-дугового разряда методом термостимулированной ионной диффузии // Металлы. 2008. №6. С. 1–13.
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. 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.
15. 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.
16. Лыгденов Б.Д. Интенсификация процессов химико-термической обработки при диффузионном титанировании. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. 135 с.
17. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / под ред. Д.М. Поута и др. М.: Машиностроение, 1987. 424 с.
18. Шулаев В.М., Таран В.С., Тимошенко А.И., Гасилин В.В. Исследование эффектов модификации поверхности металлических подложек, подвергнутых ионно-плазменной обработке // Вопросы атомной науки и техники. 2011. №6 (76). Сер.: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. (19). С. 184–192.
19. Андреев А.А. Вакуумно-дуговое модифицирование поверхности стальных изделий // ФИП. 2007. Т. 5. №3–4. С. 140–148.
20. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.