

УДК 669.018.29

Е.Н. Азаровский¹, С.А. Мубояджян¹**МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ
КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ В ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ
ПЛАЗМЕ ТИТАНА. ЧАСТЬ III**

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-29-37

Рассмотрен процесс ионного модифицирования поверхности образцов из конструкционных сталей ЭИ961 и ЭП866 в титановой плазме сильноточного вакуумно-дугового разряда (ВДР) ионно-плазменной установки (ИПУ) МАП-3 при постоянном значении силы тока вакуумной дуги, одинаковых временных интервалах обработки и заданных параметрах напряжения смещения.

Получены зависимости температуры образцов в камере напыления ИПУ МАП-3 и скорости удельного изменения массы образцов от напряжения смещения. Изучен элементный состав образцов после ионной обработки. Показано, что при силе тока ВДР, равной 300 А, и напряжении смещения 600 В температура образцов из компрессорных сталей не превышает 600°C, а напряжение инверсии, определяющее переход от конденсации к ионному травлению, составляет ~380 В – для стали ЭП866, ~600 В – для стали ЭИ961.

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

In this paper we consider the process of ion modifying of the surface of samples from compressor steel EI961 and EP866 in the titanium plasma by high-current vacuum-arc discharge (VAD) of ion-plasma unit (IPU) MAP-3 at constant vacuum arc current, identical processing time intervals and given parameters of bias voltage.

The dependence of the temperature of the samples in deposition chamber of MAP-3 and the rate of specific weight change of the samples on bias voltage is obtained. Elemental composition of the samples after ion treatment is studied. It is shown that at VAD current of 300 A and bias voltage of 600 V the temperature of the samples from compressor steels does not exceed 600°C, as well as inversion voltage that determines transition from the condensation process to the process of ion etching is ~380 V for steel EP866 and is ~600 V for steel EI961.

Keywords: steel, vacuum arc, plasma, ion modification, thermally stimulated 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

В настоящее время для повышения эксплуатационной надежности, повышения защитных и упрочняющих свойств рабочей поверхности деталей из конструкционных материалов, в промышленности широко используются различные технологии нанесения функциональных покрытий [1–11]. Одной из самых распространенных технологий, применяемой в газотурбинных двигателях (ГТД), является технология ионно-плазменного осаждения покрытий в плазме вакуумно-дугового разряда (ВДР) при высоких и управляемых энергиях ионов [12, 13]. Функциональные защитные и упрочняющие покрытия толщиной >10 мкм наносят в ионно-плазменных установках (ИПУ) типа МАП (МАП-1, МАП-2, МАП-3), разработанных в ВИАМ [14–16].

Помимо нанесения защитных и упрочняющих ионно-плазменных покрытий, для повышения

свойств деталей ГТД применяют различные технологии: модифицирования, основанные на методе термодиффузионного насыщения рабочей поверхности модификатором (алитирование, азотирование, цементация, титанирование и т. д.); насыщения поверхности из газовой фазы (цементация, азотирование); ионные технологии модифицирования из плазмы тлеющего разряда [17, 18] и технологии, основанные на процессе ионной имплантации. Одной из перспективных является технология ионного модифицирования поверхностного слоя ответственных деталей машин методом термостимулированной ионной диффузии в металлической плазме сильноточного вакуумно-дугового разряда (ВДР), разработанная в ВИАМ [19–24]. Эта технология уже применяется в промышленности для повышения коррозионной стойкости деталей из конструкционной стали ЭП866 путем насыщения поверхности в плазме

алюминиевого сплава системы Al-Co-Si-Y [25, 26].

Одной из важных особенностей технологии модифицирования в плазме ВДР является возможность проведения процесса при относительно низких температурах (ниже температуры отпуска), а также возможность регулирования температуры поверхности обрабатываемых деталей путем изменения электрических параметров процесса. В работах [21–23] показана перспективность технологии модифицирования поверхности конструкционных сталей ЭП866 и ЭИ961 методом термостимулированной ионной диффузии в титановой плазме ВДР при напряжении смещения ($U_{см}$) в интервале 150–400 В и силе тока вакуумной дуги 600 А, приведены параметры модифицированных слоев с измененной структурой и элементным составом. По результатам этих работ показано, что дальнейшие исследования следует продолжить при более низкой температуре ионного нагрева подложки путем снижения значения силы тока вакуумной дуги.

Данная работа посвящена исследованию процесса ионного модифицирования поверхности компрессорных сталей ЭП866 и ЭИ961 в титановой плазме ВДР методом термостимулированной ионной диффузии при низких (300 А) значениях силы тока вакуумной дуги ИПУ МАП-3.

Материалы и методы

Исследование процесса модифицирования титаном поверхности конструкционных сталей ЭИ961 и ЭП866, используемых в компрессоре авиационных ГТД, проводилось на плоских прямоугольных образцах с размерами 12 и 25 мм при толщине 2 мм. В качестве модификатора использовали титановый сплав ВТ1-0, из которого был изготовлен трубный катод $\varnothing 180 \times 140$ мм, высотой 340 мм для ионно-плазменной установки МАП-3.

Перед модифицированием поверхность образцов подвергали предварительной обработке (очистке). Окончательную обработку проводили бомбардировкой поверхности ионами аргона с энергией ионов ~ 2 кэВ в камере ИПУ МАП-3 по стандартному режиму. Гравиметрический контроль изменения массы образцов до и после обработки проводили путем взвешивания на аналитических весах фирмы OHAUS с точностью 10^{-4} г. Для сравнительного элементного анализа поверхностного слоя образцов после модифицирования использовали портативный рентгенофлуоресцентный анализатор материалов S1 Turbo^{SD}LE фирмы Bruker. Фазовый состав поверхности образцов из сталей ЭИ961 и ЭП866 исследовали на дифрактометре D/MAX-2500 фирмы Rigaku с монохроматическим $Cu K_{\alpha}$ -излучением. Рентгенофазовый анализ проводили с помощью специализированной программы Jade5 и базы данных PDF2 (для лучшей визуализации низкоинтенсивных линий дифрактограммы приведены в масштабе «корень

квадратный из интенсивности в импульсах»).

Результаты

После очистки поверхности, в камере напыления ИПУ МАП-3 процесс модифицирования в титановой плазме ВДР проводили в автоматическом режиме в соответствии со значениями, введенными в автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУПТ) установки МАП-3: сила тока вакуумной дуги (300 А), напряжение смещения (150–600 В) и время процесса (40 мин).

В процессе модифицирования каждые 10 мин фиксировали значения контрольной термопары ионно-плазменной установки МАП-3, на которую также подавалось напряжение смещения, аналогичное по значению $U_{см}$ на обрабатываемых образцах. По проведенным ранее исследованиям известно, что температура поверхности образцов превышает показания контрольной термопары на $\sim 50^{\circ}\text{C}$. Результаты измерения температуры поверхности образцов в процессе их ионной обработки при различных значениях напряжения смещения приведены на рис. 1.

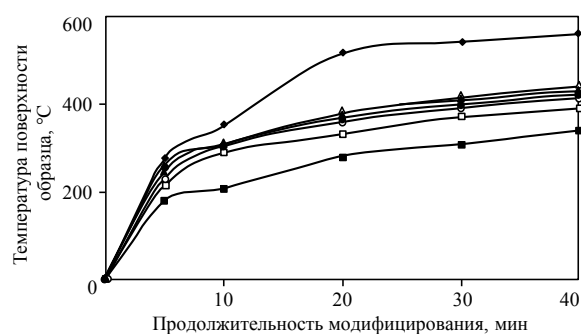


Рис. 1. Зависимость температуры поверхности образцов в камере напыления ИПУ МАП-3 от продолжительности модифицирования при силе тока вакуумной дуги 300 А и фиксированных значениях напряжения смещения: 150 (■), 250 (□), 300 (○), 350 (●), 400 (▲), 450 (△) и 600 В (◆)

Видно, что при постоянном значении силы тока ВДР в диапазоне значений напряжения смещения от 150 до 600 В конечная температура ионного нагрева образцов изменяется в пределах от 340 до $\sim 560^{\circ}\text{C}$ соответственно. Показано, что при заданных параметрах процесс модифицирования конструкционных сталей ЭИ961 и ЭП866 проходит при температурах ниже температуры отпуска этих сталей (630 и 650°C соответственно).

Зависимость скорости удельного изменения массы образцов при ионной обработке поверхности от ускоряющего ионы отрицательного напряжения смещения ($U_{см}$), подаваемого на образцы, приведена на рис. 2.

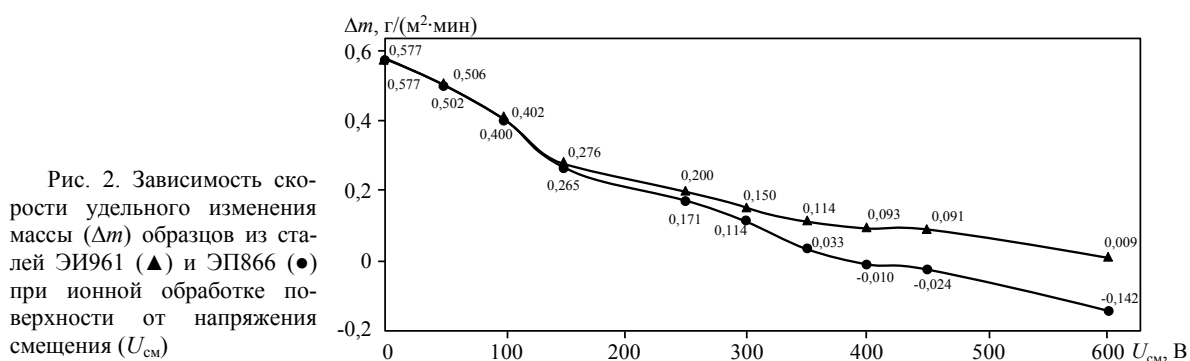


Рис. 2. Зависимость скорости удельного изменения массы (Δm) образцов из сталей ЭИ961 (▲) и ЭП866 (●) при ионной обработке поверхности от напряжения смещения ($U_{см}$)

Таблица 1

Элементный состав поверхностного слоя образцов из сталей ЭИ961 и ЭП866

Сталь	Напряжение смещения, В	Содержание элементов, % (по массе), в поверхностном слое образцов глубиной до 50 мкм		
		Ti	Fe	Cr
ЭИ961	В исходном состоянии	–	83,6	11,3
	150	26,6	59,5	10,7
	250	20,25	65,73	10,53
	300	16,46	69,53	10,63
	350	15,63	70,49	10,55
	400	14,0	71,95	10,57
	450	15,92	70,40	10,50
	600	9,7	75,78	10,62
ЭП866	В исходном состоянии	–	72,4	14,8
	150	23,7	54,59	12,94
	250	17,3	59,82	13,27
	300	17,42	59,55	13,24
	350	10,32	64,85	14,2
	400	11,86	64,0	13,92
	450	10,40	65,0	14,15
	600	6,7	67,9	14,96

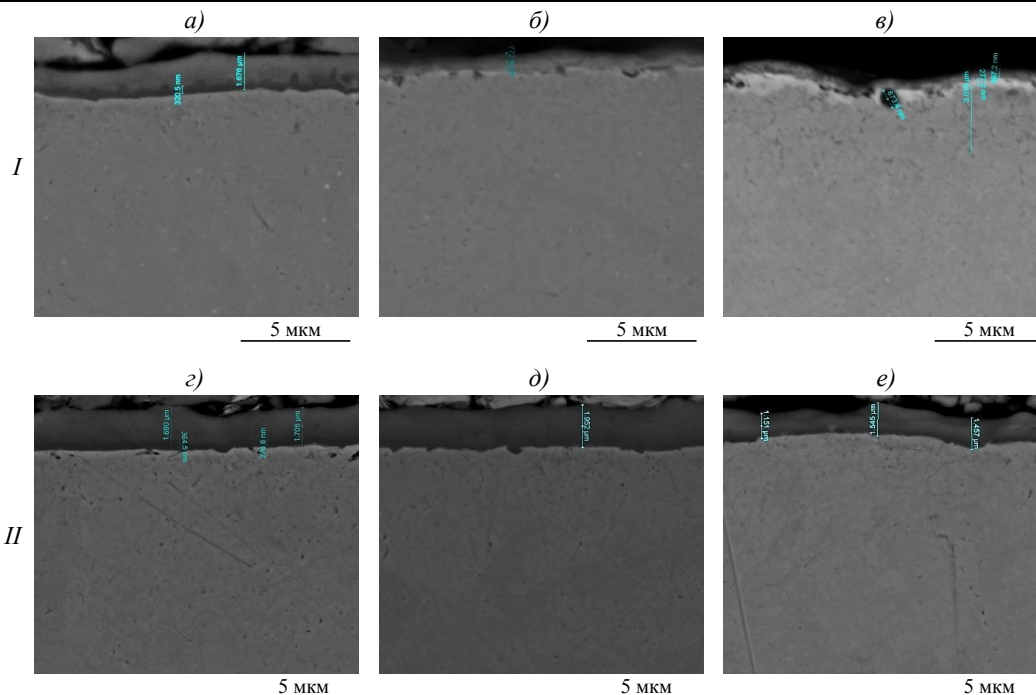


Рис. 3. Микроструктура образцов из сталей ЭП866 (I) и ЭИ961 (II) после проведения ионной обработки поверхности при силе тока дуги 300 А и значениях напряжения смещения 400 (а, г), 450 (б, д) и 600 В (в, е)

Установлено, что в интервале напряжения смещения 100–150 В наблюдается раздвоение кривых изменения скорости удельного изменения массы исследуемых сталей, что свидетельствует об изменении их структурно-фазового состояния. Напряжение инверсии ($U_{\text{инв}}$) скорости удельного изменения массы образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 (т. е. переход от процесса конденсации покрытия к ионному травлению поверхности) составляет соответственно 380 и 610 В. Сравнение этих результатов с данными, полученными авторами ранее [21–23] при силе тока ВДР 600 А, показывает, что раздвоение кривых имеет место в том же диапазоне изменения значений $U_{\text{см}}$. Напряжение инверсии при этом для сталей ЭП866 и ЭИ961 составляет соответственно 340 и 360 В, что для стали ЭИ961 значительно меньше, чем при силе тока ВДР 300 А. Таким образом, практически пропорциональное снижение (в 2 раза) плотности ионного тока из титановой плазмы на образцы приводит к существенному изменению процесса модифицирования поверхности.

Из полученных результатов (рис. 2) следует, что ионную очистку образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 в титановой плазме ВДР с силой тока 300 А необходимо проводить при напряжениях смещения соответственно ≥ 380 и ≥ 610 В, при которых будет наблюдаться ионное травление поверхности образцов из этих сталей. Результаты определения элементного состава поверхностного слоя модифицированных образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 после ионно-плазменной обработки при значении силы тока вакуумной дуги 300 А ионно-плазменной установки МАП-3 в интервале значений напряжения смещения от 150 до 600 В и при постоянной продолжительности обработки (40 мин) приведены в табл. 1.

Рентгенофлуоресцентный анализатор S1 Turbo^{SD}LE фирмы Bruker анализирует поверхностные слои образцов глубиной ≤ 50 мкм, что значительно превышает толщину сформированного титанового покрытия и/или глубину модифицированного (насыщенного титаном) слоя.

Полученные результаты определения элементного состава поверхностного слоя обработанных образцов подтверждают результаты, приведенные на рис. 2.

Для сравнения процесса модифицирования поверхности исследуемых сталей в плазме ВДР при значениях силы тока вакуумной дуги 300 и 600 А, на рис. 3 и 4 приведены микроструктуры поверхности обработанных образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961.

Микроструктуры образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961, обработанных в течение 40 мин при силе тока дуги 300 А и напряжениях смещения 400, 450 и 600 В, представлены на рис. 3. Микроструктуры образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961, исследованных ранее [21–23], которые обрабатывались от 30 до 45 мин при значениях напряжения смещения 200, 300 и 400 В и силе тока вакуумной

дуги 600 А, представлены на рис. 4. На микроструктурах поверхности сталей ЭП866 и ЭИ961 после модифицирования при высоких и низких значениях силы тока вакуумной дуги хорошо отображено влияние изменения силы тока вакуумной дуги на скорость проведения процесса модифицирования (насыщения) поверхности выбранных сталей.

При силе тока вакуумной дуги до 300 А (и соответствующей низкой плотности тока ионов титана) на исследованных шлифах образцов из стали ЭИ961 (рис. 3, *з–е*), обработанных при $U_{\text{см}}$ 400, 450 и 600 В, с ростом температуры ионного нагрева образцов до 560°C четко просматривается граница раздела между конденсированным слоем и основной; значительных структурных изменений в поверхностном слое основы и покрытия, толщина которого изменяется соответственно от 1,9 до 1,4 мкм при повышении напряжения смещения с 400 до 600 В, не наблюдается. Скорость процесса конденсации в этом диапазоне изменения $U_{\text{см}}$ превышает скорость ионного травления обрабатываемой поверхности образцов из стали ЭИ961. В образцах из стали ЭП866 (рис. 3, *а–в*) при тех же значениях параметров процесса модифицирования происходят сильные изменения структуры поверхностного слоя. При $U_{\text{см}}=400$ В видна граница раздела и диффузионный слой. С увеличением значения $U_{\text{см}}$ до 450–600 В на поверхности обработанных образцов формируется тонкий модифицированный слой толщиной до 700 нм. При $U_{\text{см}}=600$ В наблюдаются структурные изменения основы глубиной до 3 мкм.

При силе тока вакуумной дуги 600 А и потенциале смещения 200 В (рис. 4, *а, з*) на исследованных шлифах отсутствует граница раздела «покрытие материала катода–основа». При высоком значении силы тока вакуумной дуги, увеличении $U_{\text{см}}$ (с 200 до 400 В) и повышении температуры поверхности образца при ионной обработке, на шлифах (рис. 4) наблюдается увеличение глубины модифицированного слоя в зависимости от значения напряжения смещения – с 6 (при $U_{\text{см}}=200$ В) до 35 мкм (при $U_{\text{см}}=400$ В). Увеличение глубины модифицированного слоя зависит от роста температуры поверхности образца при ионной обработке поверхности.

Сравнивая микроструктуры обработанных образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 при значениях силы тока вакуумной дуги 300 (рис. 3) и 600 А (рис. 4), можно заключить, что снижение силы тока вакуумной дуги сильно влияет на скорость модифицирования поверхности стали из титановой плазмы ВДР.

Известно, что изменение силы тока вакуумной дуги в процессе модифицирования практически не влияет на энергию ионов в плазме ВДР. Энергия иона, взаимодействующего с поверхностью подложки, зависит от кратности заряда иона и заданного значения напряжения смещения, пода-

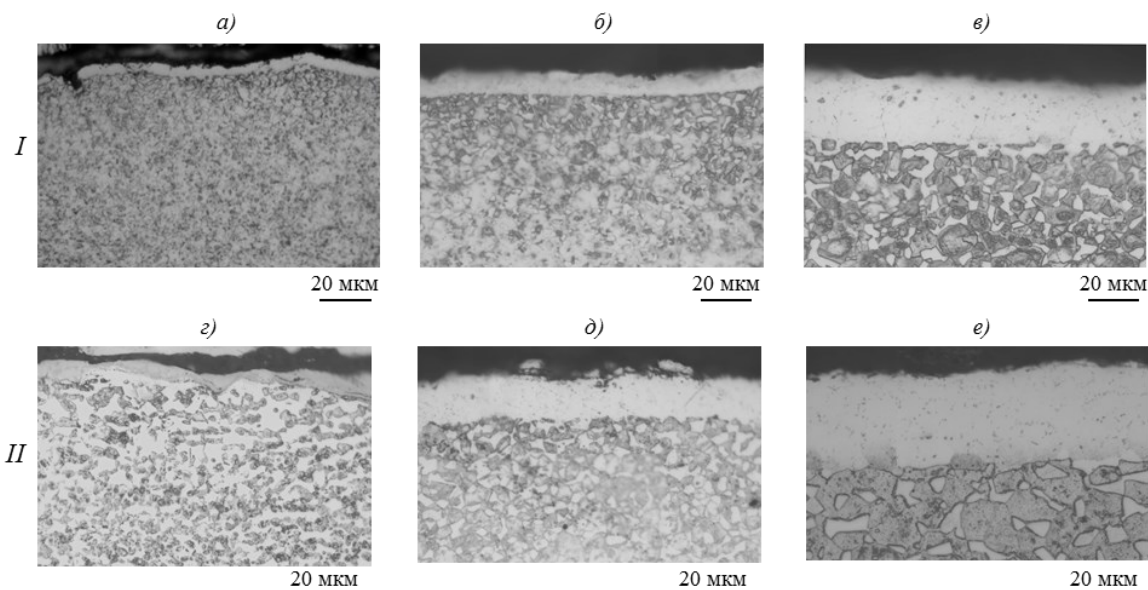


Рис. 4. Микроструктура образцов из сталей ЭП866 (I) и ЭИ961 (II) после проведения ионной обработки поверхности при силе тока дуги 600 А и значениях напряжения смещения 200 (а, з), 300 (б, д) и 400 В (в, е)

Таблица 2

Результаты фазового анализа поверхностного слоя образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961, модифицированных титаном

Напряжение смещения, В	Фазовый состав образцов из сталей*	
	ЭП866	ЭИ961
150	Основная фаза: α -Ti; фон подложки: α -Fe	Основная фаза: α -Ti; фон подложки: α -Fe
250	Основные фазы: α -Ti, β -Ti; фон подложки: α -Fe; следы фаз: (FeTi)O, FeTi	Основная фаза: α -Ti; фон подложки: α -Fe; фаза слабой интенсивности: β -Ti; следы фазы: (FeTi)O
300	Основная фаза: β -Ti; фон подложки: α -Fe; фаза слабой интенсивности: (FeTi)O; следы фаз: FeTi, α -Ti	Основные фазы: α -Ti, β -Ti; фон подложки: α -Fe; фаза слабой интенсивности: (FeTi)O
350	Основная фаза: β -Ti; фон подложки: α -Fe; следы фазы: α -Ti	Основная фаза: α -Ti; фон подложки: α -Fe; фазы слабой интенсивности: β -Ti, (FeTi)O
400	Основная фаза: β -Ti; фон подложки: α -Fe; фазы слабой интенсивности: FeTi, FeTi ₂ , TiO	Основная фаза: α -Ti; фон подложки: α -Fe; фазы слабой интенсивности: β -Ti, (FeTi)O
450	Основные фазы: β -Ti, FeTi, FeTi ₂ ; фон подложки: α -Fe; фаза слабой интенсивности: (FeTi)O	Основная фаза: α -Ti; фон подложки: α -Fe; фаза слабой интенсивности: (FeTi)O
600	Основная фаза: FeTi; фон подложки: α -Fe; фаза слабой интенсивности: (FeTi)O; следы фаз: FeTi ₂ , (Fe, Cr) ₂ Ti	Основные фазы: α -Ti, (FeTi)O; фон подложки: α -Fe

* Фазы расположены в порядке убывания их интенсивности.

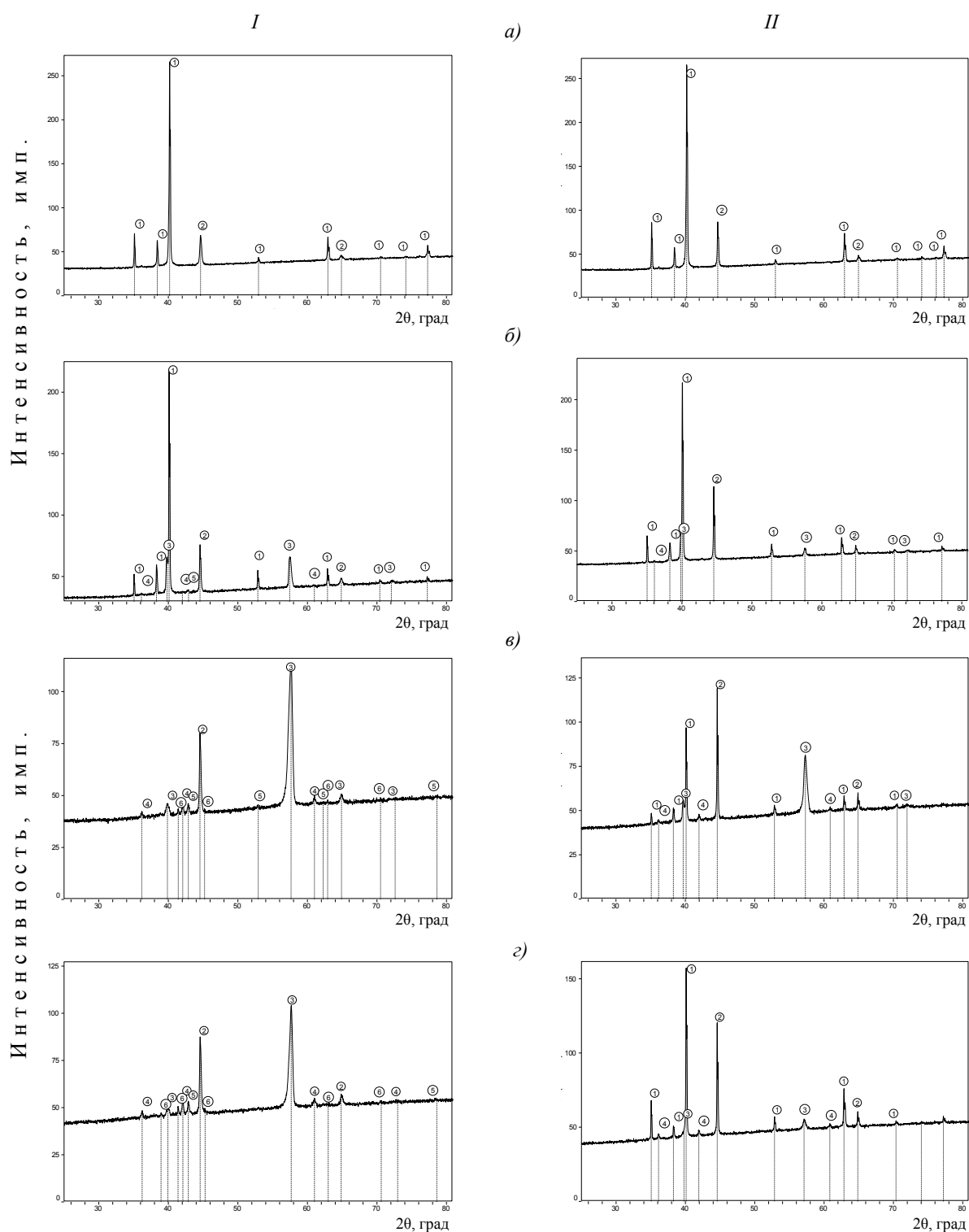


Рис. 5. Рентгенограммы образцов из сталей ЭП866 (I) и ЭИ961 (II), модифицированных титаном при силе тока вакуумной дуги 300 А и напряжении смещения 150 (а), 250 (б), 300 (в) и 350 (г): 1 – α -Ti; 2 – α -Fe; 3 – β -Ti; 4 – (Fe, Ti)O; 5 – FeTi; 6 – FeTi₂; 7 – (Fe, Cr)₂Ti

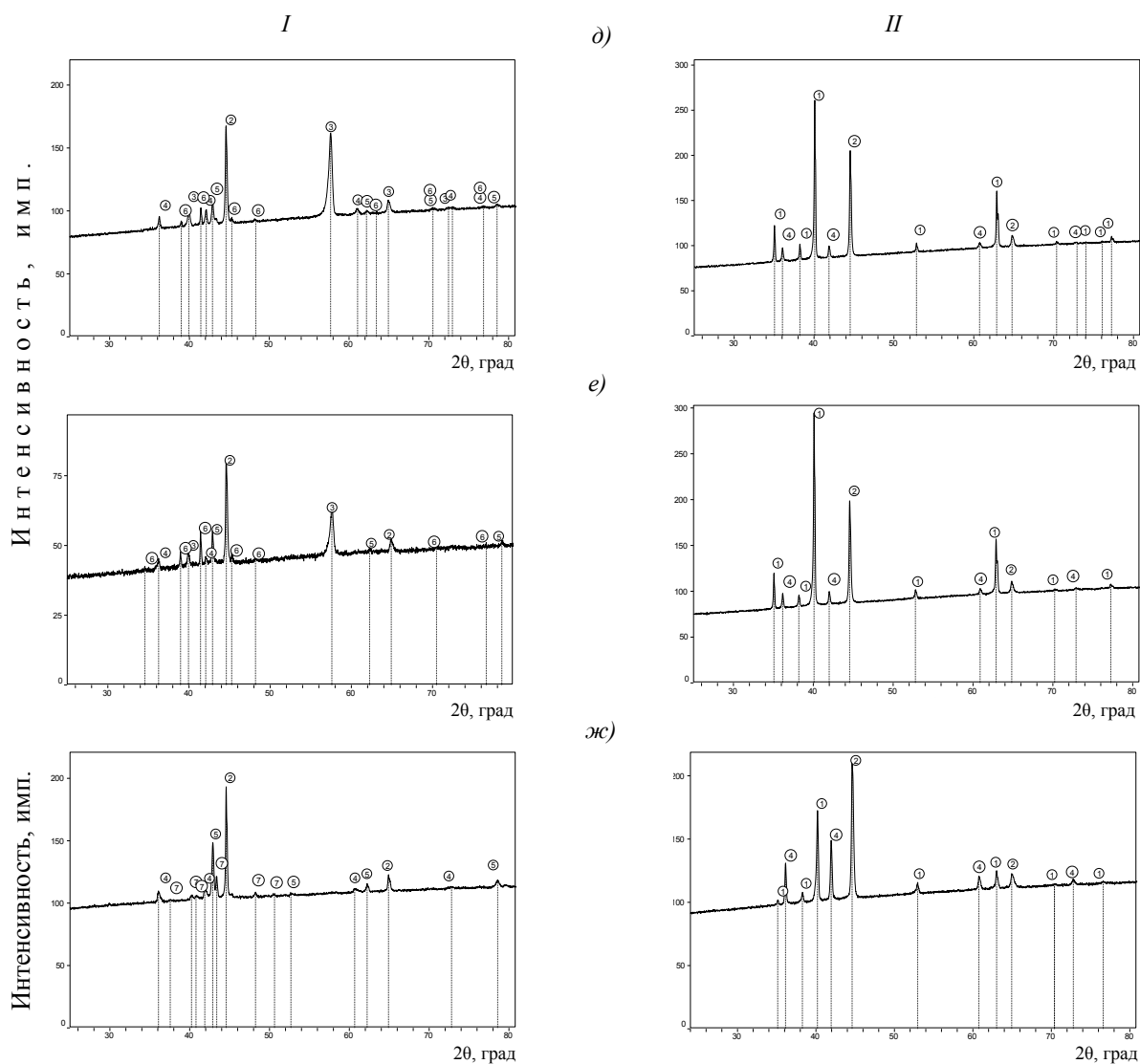


Рис. 5 (продолжение). Рентгенограммы образцов из сталей ЭП866 (I) и ЭИ961 (II), модифицированных титаном при силе тока вакуумной дуги 300 А и напряжении смещения 400 (д), 450 (е) и 600 В (ж): 1 – α -Ti; 2 – α -Fe; 3 – β -Ti; 4 – (Fe, Ti)O; 5 – FeTi; 6 – FeTi₂; 7 – (Fe, Cr)₂Ti

ваемого на деталь при обработке. Можно предположить, что энергия ионов при проведении процесса модифицирования титаном в плазме ВДР при силе тока вакуумной дуги 300 и 600 А будет одинакова. Снижение величины тока вакуумной дуги в 2 раза (с 600 до 300 А) в основном повлияло на плотность тока ионов титана, взаимодействующих с обрабатываемой поверхностью, которая снижается в ~2 раза. Наряду с этим снижение силы тока ВДР при работе в режиме «горячего» катода приводит к увеличению в 1,5–2 раза продолжительности выхода катода на квазистационарный температурный режим, который, в свою очередь, влияет на дополнительный нагрев образцов при тепловом излучении «горячего» катода.

Дальнейшие исследования нового процесса термостимулированной ионной диффузии

(модифицирования) из плазмы ВДР необходимо проводить при генерации плазмы ВДР на «холодном» катоде с принудительным охлаждением для исключения дополнительного нагрева образцов.

Фазовый состав поверхности модифицированных титаном образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 в зависимости от напряжения смещения (в исследуемом диапазоне 150–600 В) претерпевает значительные изменения. Рентгенограммы, полученные на образцах из сталей ЭП866 и ЭИ961 после модифицирования по различным режимам обработки, приведены на рис. 5, данные по фазовому составу образцов после модифицирования – в табл. 2.

При напряжении смещения 150 В основной фазой в поверхностном слое обработанных образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 является твердый раствор α -Ti. С увеличением напряжения смещения до 250 В в исследуемом поверхностном слое

образцов из стали ЭП866 начинают происходить изменения фазового состава, при которых основными фазами являются α -Ti и β -Ti, а также присутствует небольшое количество сложного оксида (FeTi)O и интерметаллида FeTi. Для стали ЭИ961 при тех же параметрах процесса ($U_{см}=250$ В) основной фазой остается α -Ti, но также наблюдаются фазы с линиями слабой интенсивности – твердый раствор β -Ti и следы фазы (FeTi)O.

По результатам анализа видно, что в процессе титанирования в плазме ВДР при увеличении напряжения смещения до 300 В для образцов из стали ЭИ961 основными фазами являются α -Ti и β -Ti, в то время как для стали ЭП866 фаза α -Ti практически полностью переходит в β -Ti и одновременно с этим наблюдается небольшое количество фазы с линиями слабой интенсивности (FeTi)O, а также следы фаз: интерметаллида FeTi и твердого раствора α -Ti.

В интервале напряжения смещения от 350 до 400 В для стали ЭП866 основной фазой остается β -Ti. Для стали ЭИ961 в том же интервале значений напряжения смещения и при $U_{см}=450$ В основной фазой является α -Ti, при этом наблюдается небольшое содержание β -Ti и сложного оксида (FeTi)O, при увеличении напряжения до 600 В основные фазы – α -Ti и (FeTi)O. Таким образом, при модифицировании титаном стали ЭИ961 в диапазоне напряжений смещения 150–450 В фазовый состав обработанной поверхности однотипный, т. е. изменения фазового состава незначительны и основной фазой остается только фаза α -Ti. Основная фаза (α -Ti) соответствует группе α -сплавов, к которой и относится сплав марки ВТ1-0. Следовательно, в процессе модифицирования стали ЭИ961 при силе тока вакуумной дуги 300 А в интервале напряжения смещения 150–450 В преимущественно имеет место процесс конденсации покрытия из сплава ВТ1-0 без изменения его фазового состава. Фазовые изменения поверхностного слоя стали ЭИ961 начинают протекать лишь при высоких значениях напряжения смещения, а именно – от 600 В.

Для стали ЭП866 при напряжении смещения 450 В происходят значительные изменения фазового состава исследуемого слоя, где основными фазами являются твердый раствор β -Ti и интерметаллиды FeTi и FeTi₂, также присутствует фаза сложного оксида (FeTi)O с линиями слабой интенсивности. При увеличении напряжения смещения до 600 В основной фазой остается интерметаллид FeTi, при этом присутствует фаза (FeTi)O и проявляются следы интерметаллидов FeTi₂ и (Fe, Cr)₂Ti.

Сравнивая результаты, полученные при модифицировании поверхности образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 в плазме титана при силе тока вакуумной дуги 300 и 600 А, можно отметить, что снижение плотности тока ионов титана (ток вакуумной дуги 300 А) приводит к росту напряжения инверсии, снижению скорости ионного насыщения

поверхности, снижению температуры нагрева подложки в процессе ионной обработки, а также к изменению структурно-фазового состояния поверхности при одинаковых значениях напряжения смещения.

Обсуждение и заключения

Проведены исследования процесса модифицирования поверхности образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 в титановой плазме ВДР установки МАП-3 на «горячем» катоде при значениях напряжения смещения 150–600 В и силе тока вакуумной дуги 300 А.

Показано, что температура нагрева образцов при модифицировании изменяется в пределах от 340 до ~560°C, что для конструкционных сталей ЭИ961 и ЭП866 ниже температуры их отпуска (630 и 650°C соответственно).

Установлено, что процесс модифицирования поверхности образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 в титановой плазме ВДР приводит к существенным изменениям элементного и фазового составов их поверхностного слоя, а соответственно, и функциональных свойств модифицированных образцов. Определены напряжения инверсии для сталей ЭП866 и ЭИ961 при силе тока вакуумно-дугового разряда 300 А, при которых наблюдается переход от процесса конденсации титана к процессу ионного травления подложки, равные соответственно 380 и 610 В.

Определено, что основные фазовые изменения в поверхности стали ЭП866 при модифицировании титаном при силе тока ВДР 300 А начинают происходить при напряжении смещения 300 В и температуре ~360–380°C, при которых α -Ti переходит в β -Ti. При напряжении смещения 450 В модифицированный слой состоит в основном из твердого раствора β -Ti и интерметаллидов FeTi и FeTi₂. При высоком значении напряжения смещения (600 В) и температуре нагрева ~530–560°C фазовый состав обработанной поверхности стали ЭП866 в основном состоит из интерметаллида FeTi.

При модифицировании титаном стали ЭИ961 в диапазоне напряжений смещения от 150 до 450 В фазовый состав обработанной поверхности не изменяется и состоит из твердого раствора α -Ti. Основные изменения фазового состава начинаются при высоких значениях напряжения смещения, при которых основными фазами являются α -Ti и оксид (FeTi)O.

Исследования показывают, что сильное влияние на процесс модифицирования в плазме титана оказывает плотность тока ионов, величина которой меняется в зависимости от изменения силы тока ВДР.

Процесс модифицирования в плазме ВДР является перспективным и имеет широкие технологические возможности. Работу по данному направлению следует продолжить.

Благодарности

Авторы выражают благодарность П.Л. Журавлевой за проведение рентгеновских исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мубояджян С.А. Ионно-плазменные процессы получения диффузионных алюминидных покрытий //Металлы. 2010. №2. С. 5–15.
2. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum-plasma technique of protective coatings production of complex alloys //Metal Science and Heat Treatment. 1995. №2. P. 15–18.
3. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising GTES //Russian metallurgy (Metally). 2012. V. 2012. №1. P. 1–7.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. и др. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 71–81.
8. Мубояджян С.А. Перспективные покрытия для деталей авиадвигателей //Военный парад. 2009. №1 (91). С. 33–34.
9. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Металлы. 2012. №1. С. 5–13.
10. Мубояджян С.А., Галоян А.Г. Комплексные термодиффузионные жаростойкие покрытия для безуглеродистых жаропрочных сплавов на никелевой основе //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 25–30.
11. 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.
12. Будиновский С.А., Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Применение аналитической модели определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для рабочих лопаток авиационных турбин //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. №SP2. С. 26–37.
13. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок //Крылья Родины. 2010. №4. С. 31–33.
14. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
15. 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.
16. 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.
17. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия. 1984. С. 50–189.
18. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками /Под ред. Д.М. Поута и др. М.: Машиностроение. 1987. 424 с.
19. Мубояджян С.А. Модифицирование металлической поверхности в плазме вакуумно-дугового разряда методом термостимулированной ионной диффузии //Металлы. 2008. №6. С. 1–13.
20. Азаровский Е.Н., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности деталей из конструкционных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана. Ч. I. //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 20–25.
21. Азаровский Е.Н., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности деталей из конструкционных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана. Ч. II. //Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 3–11.
22. Muboyadzhyan S.A., Azarovskii E.N. New Process of Ion Surface Modification of Compressor Steel in the Vacuum Arc Plasma of Titanium //Russian metallurgy (Metally). 2013. №6. P. 33–74.
23. 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. Сер. Вакуум. Чистые материалы, сверхпроводники. 2011. Т. 19. С. 184–192.
24. Андреев А.А. Вакуумно-дуговое модифицирование поверхности стальных изделий //ФИП. 2007. Т. 5. №3–4. С. 140–148.
25. Мубояджян С.А. Особенности осаждения из двухфазного потока многокомпонентной плазмы вакуумно-дугового разряда, содержащего микрокапли испаряемого материала //Металлы. 2008. №2. С. 20–34.
26. 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. 2013. №1. Ст. 02 (viam-works.ru).