

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ В ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ПЛАЗМЕ ТИТАНА

Рассмотрен процесс модифицирования титаном поверхности образцов из сталей ЭИ961 и ЭП866 в плазме сильнотоочного вакуумно-дугового разряда ионно-плазменной установки МАП-3 при напряжении смещения в диапазоне от 0 до 400 В. Получена зависимость скорости удельного изменения массы образцов от напряжения смещения и показано, что процесс модифицирования поверхности образцов начинается при напряжении смещения в диапазоне от 100 до 150 В и температуре их ионного нагрева 350–400°C. Изучен элементный состав поверхностного слоя модифицированных образцов в зависимости от напряжения смещения и определены значения напряжения, при котором имеет место инверсия скорости осаждения и переход к ионному травлению поверхности обрабатываемых образцов. Показано, что процесс ионного модифицирования в плазме титана позволяет изменять структурное состояние поверхности образцов из сталей ЭИ961 и ЭП866.

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

SURFACE MODIFICATION OF PARTS MADE OF STRUCTURAL STEEL IN VACUUM ARC TITANIUM PLASMA

The surface modification process of EI961 and EI866 steel samples in the titanium plasma of high-current vacuum-arc ion-plasma unit MAP-3 at the bias voltage within the range of 0–400 V is considered. A dependence of the specific rate of the sample weight change on the bias voltage was derived and it was shown that the modification process of the sample surface starts at the bias voltage within the range of 100–150 V and at temperature of the ion heating within 350–400°C. The elemental composition of the surface layer of the modified samples was studied as a function of the bias voltage. The values of voltage, when an inversion of the deposition rate and the transition to the ion etching of the surface of treated samples take place, were defined. It was shown that the ion modification of steel samples in titanium plasma allows one to change the structural state of the EI961 and EI866 steel sample surface.

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

¹ Федеральное 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

Технология модифицирования поверхности ответственных деталей ГТД в плазме вакуумно-дугового разряда (ВДР) ионно-плазменных установок МАП-2 и МАП-3 (разработка ВИАМ) уже применяется в промышленности для повышения коррозионной стойкости деталей из стали ЭП866 насыщением поверхности в плазме алюминиевого сплава системы Al–Co–Si–Y [1–3]. Технология, реализуемая на установках типа МАП, отличается высокой точностью воспроизведения толщины и состава модифицированных слоев, простотой оборудования и низкой стоимостью обработки среди из-

вестных вакуумных методов нанесения защитных и упрочняющих покрытий [4–6]. Новый процесс термостимулированной ионной диффузии в плазме сильноточного ВДР обеспечивает получение модифицированных слоев глубиной – от долей до десятков мкм при токах вакуумно-дугового разряда 300–700 А, напряжении смещения на обрабатываемых изделиях 250–500 В и продолжительности процесса не более 1 ч [7, 8].

Процесс ионного модифицирования поверхности деталей из конструкционных материалов позволяет изменять структурно-фазовое состояние поверхности, а соответственно и свойства этих материалов, связанные с состоянием поверхности (жаростойкость, коррозионную стойкость, длительную прочность и др.) [9]. Модифицирование поверхности в плазме ВДР позволяет значительно расширить возможности управления физико-химическими свойствами поверхности с целью повышения эксплуатационной надежности ответственных деталей машин [10–12].

Данная работа посвящена исследованию процесса модифицирования (термостимулированной ионной диффузии) поверхности образцов из сталей ЭИ961 и ЭП866 в титановой плазме ВДР установки МАП-3.

Методика и оборудование для проведения экспериментов

Исследование процесса модифицирования поверхности конструкционных сталей ЭИ961(13X11H2BMФ) и ЭП866 (15X16K5H2MBФAB), используемых в авиационных ГТД, проводилось на плоских образцах размером 12,25×12,25 мм и толщиной 2 мм. В качестве модификатора использовали титан марки BT1-0, из которого изготовлен трубный катод $\varnothing 180 \times 140$ мм, высотой 340 мм для ионно-плазменной установки МАП-3.

Поверхность образцов обезжиривали в щелочной ванне, промывали в проточной воде, подвергали сушке, а затем проводили пескоструйную обработку электрокорундом с размером зерна основной фракции 120–160 мкм. Окончательную очистку поверхности образцов проводили ионным травлением в плазме ВДР ионно-плазменной установки (ИПУ) МАП-3 при напряжении смещения 300 В в течение 3 мин непосредственно перед модифицированием. При модифицировании поверхности образцов контролировались ток ВДР, напряжение смещения на обрабатываемых образцах и показания контрольной термопары ИПУ МАП-3. Для гравиметрического контроля изменения массы образцов в процессе модифицирования производилось их взвешивание на аналитических весах фирмы «ОНАУС» с точностью 10^{-4} г.

Исследования модифицированного слоя проводились с использованием металлографического микроскопа GX-51 фирмы «Olympus». Для элементного анализа поверхностного слоя образцов после модифицирования использовали портативный рентгенофлуоресцентный анализатор материалов S1 Turbo^{SD} LE фирмы «Bruker».

Результаты эксперимента и их обсуждение

Процесс модифицирования поверхности образцов проводили в течение 30, 45 и 60 мин при постоянном токе вакуумной дуги 600 А и фиксированных значениях напряжения смещения на образцах в диапазоне от 0 до 400 В. При модифицировании фиксировались показания контрольной термопары, на которую также подавалось напряжение смещения. Температура образцов, по проведенным ранее исследованиям, превышает показания контрольной термопары на $\sim 50^\circ\text{C}$. С учетом этого на рис. 1 приведены результаты по измерению температуры образцов в процессе их ионной обработки при различных значениях напряжения смещения. Видно, что при постоянном значении тока ВДР в диапазоне значений напряжения смещения от 0 до 400 В квазистационарная температура ионного нагрева образцов изменяется соответственно в пределах от 350 до $\sim 765^\circ\text{C}$.

На рис. 2 приведена зависимость скорости удельного изменения массы образцов при ионной обработке поверхности от ускоряющего ионы отрицательного напряжения

смещения ($U_{см}$), подаваемого на образцы. Видно, что при значениях напряжения смещения от 0 до 150 В наблюдается снижение скорости удельного изменения массы, связанное с усилением процесса ионного травления (катодного распыления) поверхности титанового покрытия, осаждаемого из плазмы ВДР. При напряжении смещения 150 В наблюдается заметный перегиб и разделение кривых (в зависимости от материала основы), что, согласно работе [13], указывает на изменение фазового и элементного состава поверхностного слоя осаждающегося покрытия, приводящее к изменению скорости ионного травления поверхности покрытия вследствие различия коэффициентов катодного распыления чистого титана и измененного слоя. Можно предположить, что в диапазоне $U_{см}=100-150$ В начинается процесс модифицирования поверхностного слоя образцов, сопровождающийся изменением структурно-фазового состояния поверхности растущего покрытия.

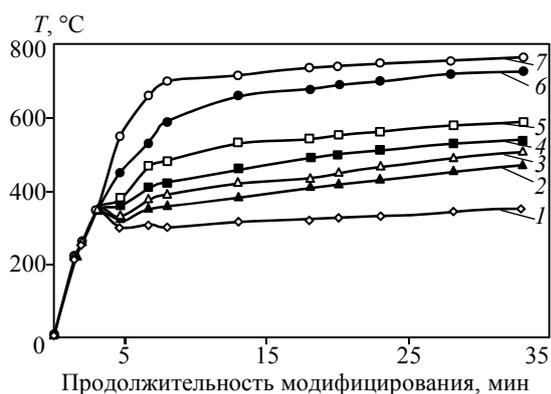


Рис. 1. Зависимость температуры образцов в камере напыления ионно-плазменной установки МАП-3 от продолжительности модифицирования при токе вакуумной дуги 600 А и фиксированных значениях напряжения смещения: 0 (1), 50 (2), 100 (3), 150 (4), 200 (5), 300 (6) и 400 В (7)

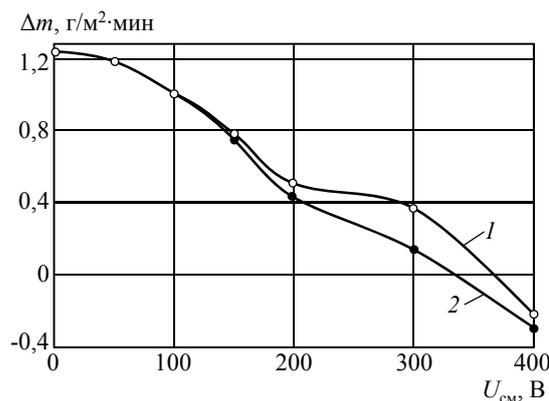


Рис. 2. Зависимость скорости удельного изменения массы образцов из сплавов ЭИ961 (1) и ЭП866 (2) при ионной обработке их поверхности от напряжения смещения

При дальнейшем росте напряжения смещения наблюдается инверсия скорости изменения удельного привеса образцов, причем для стали ЭП866 напряжение смещения, при котором наблюдается инверсия, составляет 340 В, а для стали ЭИ961: 360 В. При напряжении смещения свыше 340–360 В скорость ионного травления поверхности образцов превышает скорость осаждения покрытия при этих напряжениях, что приводит к уменьшению их массы по сравнению с массой исходного образца. При этом если скорость насыщения поверхности образца в титановой плазме будет превышать скорость ее ионного травления, то на поверхности будет наблюдаться модифицированный слой. Из зависимостей на рис. 2 следует, что окончательную ионную очистку образцов в плазме ВДР установки МАП-3 необходимо проводить при напряжении смещения на образцах >340 и >360 В для сталей ЭП866 и ЭИ961 соответственно, при котором будет наблюдаться ионное травление поверхности образцов из этих сталей.

Результаты определения элементного состава поверхностного слоя модифицированных образцов приведены в табл. 1. Эти результаты подтверждают основные выводы по анализу зависимости скорости удельного изменения массы образцов от напряжения смещения. Глубина анализируемого поверхностного слоя образцов превышает толщину осажденного покрытия, поэтому для образцов из стали ЭИ961 при отсутствии напряжения смещения содержание железа достигает ~39% при продолжительности об-

работки 30 мин. Для образцов из стали ЭП866 при отсутствии напряжения смещения и той же продолжительности обработки содержание железа не превышает 31%. Увеличение продолжительности обработки до 60 мин приводит к росту толщины конденсированного слоя титана и содержания титана в анализируемом слое. Высокое процентное содержание титана в поверхностном слое указывает на то, что в диапазоне потенциала смещения от 0 до 100 В преимущественно идет процесс его осаждения.

С ростом напряжения смещения в диапазоне от 100 до 150 В наблюдается значительное снижение процентного содержания титана в поверхностном слое образцов и увеличение процентного содержания железа. При значении напряжении смещения 150 В содержание железа превышает содержание титана в поверхностном слое, что, в свою очередь, подтверждает начало процесса модифицирования в указанном диапазоне изменения напряжения смещения. В интервале значений $U_{см}$ от 150 до 400 В наблюдается дальнейшее снижение содержания титана в поверхностном слое и увеличение доли элементов материала подложки, что указывает на протекание процесса модифицирования поверхности (термостимулированного ионного насыщения поверхности исследуемых образцов титаном).

Таблица 1

Элементный состав поверхностного слоя образцов из сталей ЭИ961 и ЭП866 после ионно-плазменной обработки при различных значениях напряжения смещения и тока вакуумного разряда 600 А

Сталь	$U_{см}$, В (продолжительность обработки, мин)	Содержание элементов, % (по массе) в поверхностном слое глубиной до 50 мкм								
		Ti	Fe	Cr	Co	Ni	W	Mo	Nb	Mn (V)
ЭИ961	Без обработки	–	83,6	11,3	–	1,77	1,59	0,42	–	0,2 (0,23)
	0 (30)	52,8	39,2	5,43	–	0,54	1,05	0,46	–	0,32
	50 (60)	88,3	10,2	0,46	–	0,14	0,47	0,30	–	0,16
	100 (60)	82,0	15,4	1,17	–	0,21	0,64	0,34	–	0,20
	150 (30)	32,5	55,6	8,86	–	0,71	1,39	0,50	–	0,33
	200 (30)	27,6	59,5	9,65	–	0,80	1,57	0,50	–	0,27
	300 (30)	20,8	65,0	10,9	–	0,87	1,67	0,50	–	0,21
	400 (45)	19,1	66,7	10,3	–	1,24	1,82	0,54	–	0,17
ЭП866	Без обработки	–	72,4	14,8	5,66	3,66	0,76	1,43	0,29	0,25 (0,25)
	0 (30)	55,7	31,0	6,79	3,21	0,62	0,51	1,44	0,33	0,37
	0 (60)	92,6	4,86	0,19	0,85	0,20	0,12	0,90	0,21	0,10
	50 (60)	87,7	8,39	0,84	1,27	0,19	0,21	0,99	0,22	0,17
	100 (60)	87,3	8,71	0,86	1,33	0,19	0,23	1,02	0,23	0,16
	150 (30)	38,8	43,5	9,99	3,87	0,88	0,64	1,59	0,35	0,31
	200 (30)	27,7	51,5	12,4	4,27	1,05	0,73	1,66	0,36	0,26
	300 (30)	26,5	59,9	10,1	0,27	0,83	1,53	0,50	0,00	0,26
400 (45)	17,3	59,1	15,0	4,31	1,08	0,87	1,70	0,40	0,13	

Полученные результаты подтверждаются металлографическими исследованиями образцов (рис. 3 и 4). На микроструктуре образцов, обработанных при напряжении смещения 0–100 В в течение 60 мин, наблюдается формирование покрытия, толщина которого с ростом $U_{см}$ уменьшается с ~16,5 до 13 мкм, что соответствует результатам, представленным на рис. 2. При этом на поверхности образцов в основном имеет место процесс конденсации покрытия без заметного изменения структурно-фазового состояния в самом покрытии, на границе раздела «покрытие–материал основы» и в поверхностном слое материала основы (рис. 3, а, б и 4, а, б).

При значении $U_{см}=150$ В на поверхности образцов формируется конденсированный слой толщиной ~6 мкм с уже заметным изменением элементного состава согласно данным табл. 1.

При потенциале смещения 200 В на исследованных микрошлифах отсутствует граница раздела «конденсированный слой–основа», поэтому в диапазоне $U_{см}$ от 200 до 400 В на микрошлифах наблюдается модифицированный слой, глубина которого увеличивается с ростом $U_{см}$ от 5–6 (200 В) до 35 мкм (400 В). Причем увеличение глубины модифицированного слоя связано как с ростом температуры нагрева образцов, так и с увеличением $U_{см}$, которое в основном определяет рост температуры образца в процессе модифицирования. С ростом $U_{см}$ изменяется элементный состав модифицированного слоя и наблюдается снижение содержания в слое титана (см. табл. 1)

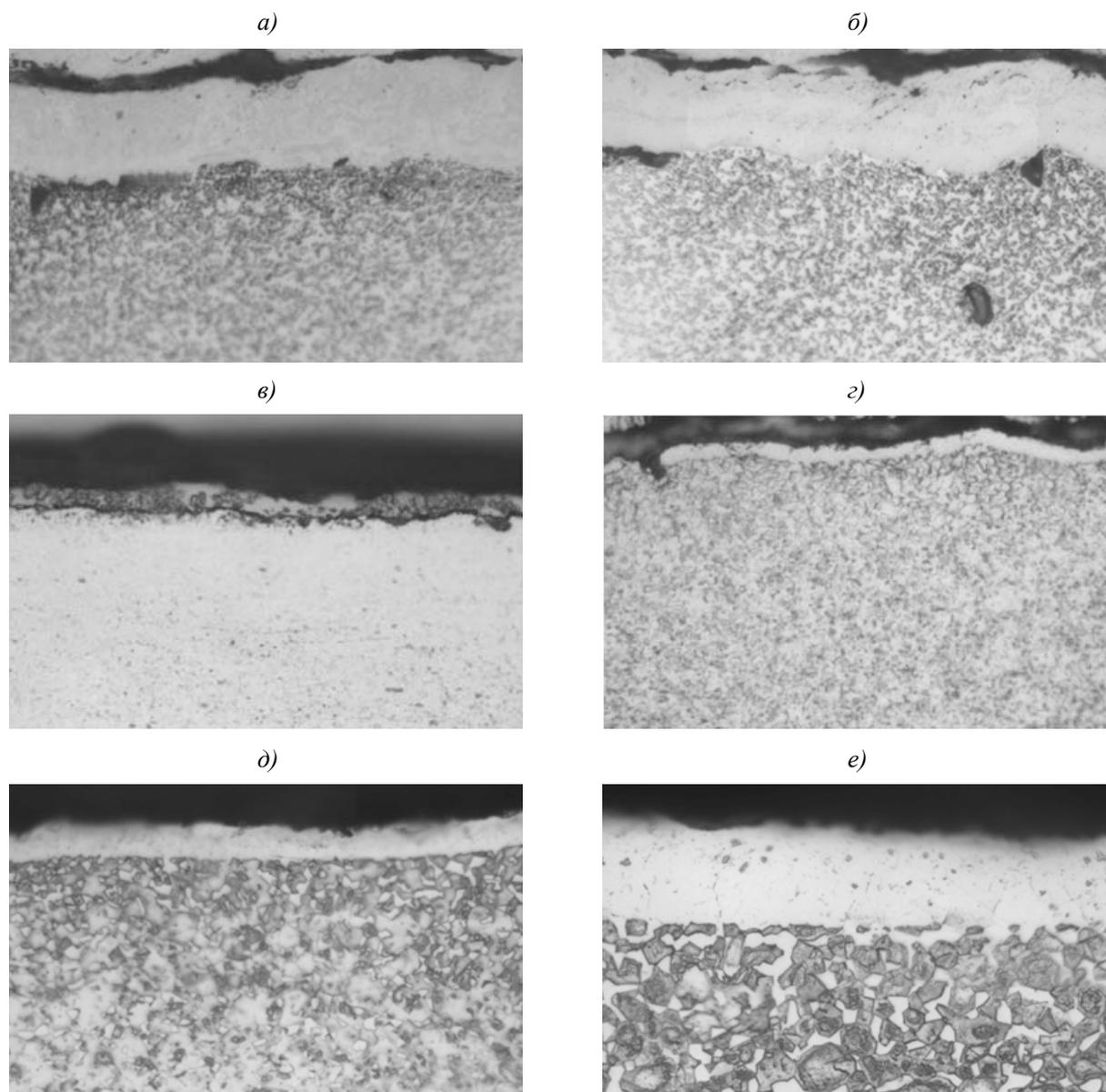


Рис. 3. Микроструктура ($\times 1000$) образцов из стали ЭП866 после проведения ионной обработки поверхности при различных значениях напряжения смещения $U_{см}$: 50 (а), 100 (б), 150 (в), 200 (г), 300 (д) и 400 В (е)

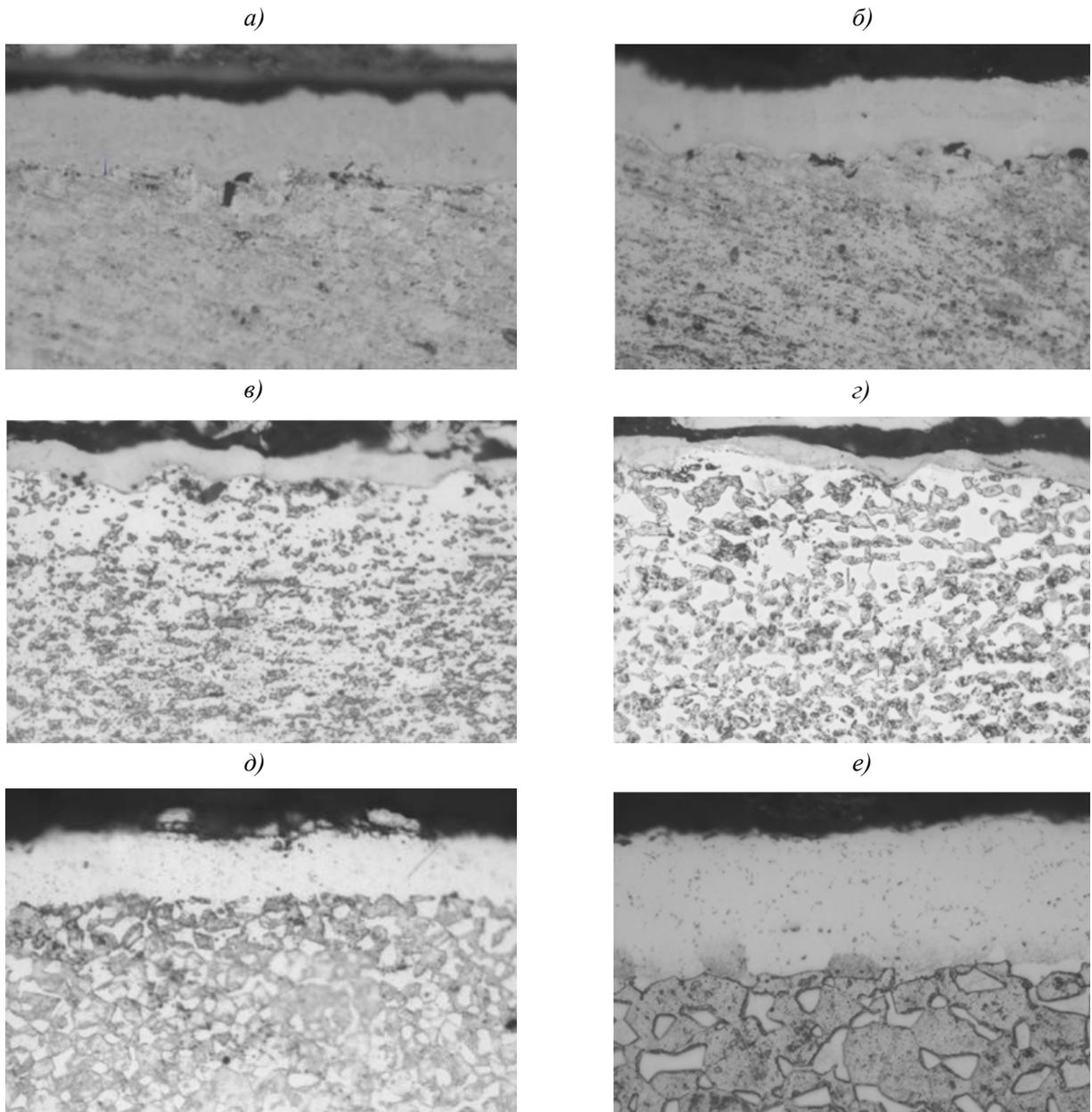


Рис. 4. Микроструктура ($\times 1000$) образцов из стали ЭИ961 после проведения ионной обработки поверхности при различных значениях напряжения смещения $U_{см}$: 50 (а), 100 (б), 150 (в), 200 (г), 300 (д) и 400 В (е)

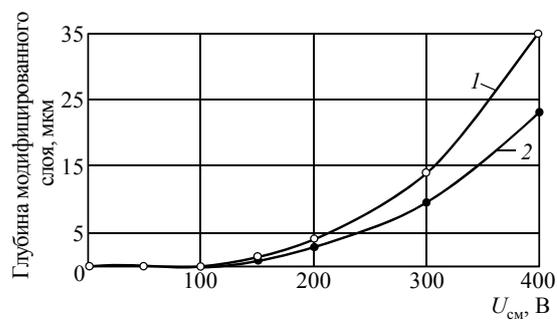


Рис. 5. Зависимость глубины модифицированного слоя на образцах из сплавов ЭИ961 (1) и ЭП866 (2) от напряжения смещения

Данные металлографического анализа по толщине конденсированного и модифицированного слоев в зависимости от напряжения смещения приведены в табл. 2 и показаны на рис. 5, где дана зависимость глубины внешнего модифицированного слоя от напряжения смещения.

Таблица 2

Толщина конденсированного и глубина внешнего модифицированного слоя на поверхности образцов из сталей ЭИ961 и ЭП866 в зависимости от значений напряжения смещения $U_{см}$

Сталь	Толщина конденсированного слоя/глубина модифицированного слоя (без учета переходной зоны от слоя к материалу основы), мкм, при напряжении смещения $U_{см}$, В						
	0	50	100	150	200	300	400
ЭИ961	16,3/0	15,2/0	13,4/0	6,7/0	0,0/6,9	0,0/14,2	0,0/35,1
ЭП866	16,5/0	15,1/0	13,6/0	7,0/0	0,0/4,4	0,0/6,7	0,0/24

Модифицированный слой состоит из внешнего слоя и переходной зоны (см. рис. 3, $z-e$ и 4, $z-e$). В табл. 2 приведены значения толщины только внешнего модифицированного слоя, выявленные в результате металлографического анализа. Переходная зона между внешним модифицированным слоем и материалом основы имеет большую глубину, чем внешний модифицированный слой.

При одинаковых параметрах ионной обработки поверхности для стали ЭИ961 глубина внешнего модифицированного слоя больше, чем на стали ЭП866. В диапазоне изменения $U_{см}$ от 300 до 400 В и тока вакуумной дуги 600 А температура поверхности на обрабатываемых образцах при модифицировании $>700^{\circ}\text{C}$, что превышает рабочую температуру этих сталей. Поэтому дальнейшие исследования процесса модифицирования поверхности образцов и деталей из сталей ЭП866 и ЭИ961 в титановой плазме ВДР следует проводить при режимах, обеспечивающих снижение температуры на обрабатываемой поверхности.

По результатам проведенных исследований показана возможность модифицирования поверхности образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 в титановой плазме ВДР установки МАП-3 при значениях $U_{см}$ в интервале от 200 до 400 В и токе дуги 600 А. В интервале значений $U_{см}$ от 200 до 400 В у стали ЭП866 формируется модифицированный слой глубиной от 6,7 до 23 мкм, содержание титана в поверхностном слое – до 22%; у стали ЭИ961 при тех же значениях $U_{см}$ глубина модифицированного слоя изменяется от 14 до 35 мкм, содержание титана в поверхностном слое – до 20%.

Показано, что процесс модифицирования поверхности образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 в титановой плазме ВДР приводит к существенным изменениям структуры и элементного состава поверхностного слоя, а соответственно и к изменению свойств этой поверхности (жаростойкости, коррозионной стойкости, усталости, износостойкости и т. д.).

Работу следует продолжить в направлении металлофизических исследований модифицированного слоя, исследований служебных характеристик образцов из сталей ЭП866 и ЭИ961 после ионной обработки и снижения температуры ионного нагрева поверхности образцов в процессе модифицирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 71–81.

2. Мубояджян С.А. Перспективные покрытия для деталей авиадвигателей //Военный парад. 2009. №1 (91). С. 33.
3. Помелов Я.А., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности конструкционных материалов методом ионной обработки в плазме вакуумного дугового разряда /В сб. Авиационные материалы и технологии. Периодический выпуск. 2003. №3. С. 85–94.
4. 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.
5. 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.
6. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Нанослойные упрочняющие покрытия для защиты стальных и титановых лопаток компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 3–8.
7. Мубояджян С.А. Современные вакуумные процессы ионной обработки поверхности //Конверсия в машиностроении. 2004. №4. С. 69–77.
8. Мубояджян С.А. Модифицирование металлической поверхности в плазме вакуумно-дугового разряда методом термостимулированной ионной диффузии //Металлы. 2008. №6. С. 1–13.
9. 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. Спец. вып. Перспективные конструкционные материалы и технологии. 2011. С. 149–163.
10. 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).
11. 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. №19. С. 184–192.
12. Андреев А.А. Вакуумно-дуговое модифицирование поверхности стальных изделий //ФИП ФИП PSE. 2007. Т. 5. №3–4. С. 140–148.
13. Мубояджян С.А. Особенности осаждения из двухфазного потока многокомпонентной плазмы вакуумно-дугового разряда, содержащего микрокапли испаряемого материала //Металлы. 2008. №2. С. 20–34.

REFERENS LIST

1. Mubojadzhan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S., Egorova L.P., Bulavinceva E.E. Zashhitnye i uprochnjajushhie ionno-plazmennye pokrytija dlja lopatok i drugih otvetstvennyh detalej kompressora GTD [Protective and Strengthening Ion-Plasma Coatings for Blades and Other Critical GTE Compressor Parts] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 71–81.
2. Mubojadzhan S.A. Perspektivnye pokrytija dlja detalej aviadvigatel'ej [Perspective coverings for details of aircraft engines] //Voennyj parad. 2009. №1 (91). S. 33.
3. Pomelov Ja.A., Mubojadzhan S.A. Modificirovanie poverhnosti konstrukcionnyh materialov metodom ionnoj obrabotki v plazme vakuumnogo dugovogo razrjada [Modifying of a surface of constructional materials by a method of ionic processing in plasma of the vacuum arc category] /V sb. Aviacionnye materialy i tehnologii. Periodicheskij vypusk. 2003. №3. S. 85–94.
4. Mubojadzhan S.A., Budinovskij S.A., Gajamov A.M., Matveev P.V. Vysokotemperaturnye zharostojkie pokrytija i zharostojkie sloi dlja teplozashhitnyh pokrytij [High-temperature heat-resistant coatings and heat-resistant layers for thermoprotective coatings] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №1. S. 17–20.
5. Kablov E.N., Mubojadzhan S.A. Zharostojkie i teplozashhitnye pokrytija dlja lopatok turbiny vysokogo davlenija perspektivnyh GTD [Heat-resistant and heat-shielding coverings for shovels of the turbine of a high pressure of perspective GTE] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 60–70.

6. Mubojadzhjan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Nanoslojnye uprochnjajushhie pokrytija dlja zashhity stal'nyh i titanovyh lopatok kompressora GTD [Nanolayer strengthening coatings for the protection of steel and titanium GTE compressor blades] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №3. S. 3–8.
7. Mubojadzhjan S.A. Sovremennye vakuumnye processy ionnoj obrabotki poverhnosti [Modern vacuum processes of ionic processing of a surface] //Konversija v mashinostroenii. 2004. №4. S. 69–77.
8. Mubojadzhjan S.A. Modificirovanie metallicheskoj poverhnosti v plazme vakuumno-dugovogo razrjada metodom termostimulirovannoj ionnoj diffuzii [Modifying of a metal surface in plasma of the vacuum and arc category a method of thermostimulated ionic diffusion] //Metally. 2008. №6. S. 1–13.
9. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A. Ionnoe travlenie i modificirovanie poverhnosti otvetstvennyh detalj mashin v vakuumno-dugovoj plazme [Ionic etching and modifying of a surface of responsible details of cars in vacuum and arc plasma] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. Mashinostroenie. Spec. vyp. Perspektivnye konstrukcionnye materialy i tehnologii. 2011. S. 149–163.
10. Mubojadzhjan S.A., Lucenko A.N., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Issledovanie vozmozhnosti povyshenija sluzhebnyh harakteristik lopatok kompressora GTD metodom ionnogo modificirovanija poverhnosti [The research opportunity to improve service properties of compressor GTE blades ion modified surface method] //Trudy VIAM. 2013. №1. St. 02 (viam-works.ru).
11. Shulaev V.M., Taran V.S., Timoshenko A.I., Gasilin V.V. Issledovanie jeffektov modifikacii poverhnosti metallicheskih podlozhek, podvergnutyh ionno-plazmennoj obrabotke [Research of effects of modification of a surface of the metal substrates subjected to ion-plasma processing] //Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Ser. Vakuum. Chistye materialy, sverhprovodniki. 2011. №19. S. 184–192.
12. Andreev A.A. Vakuumno-dugovoe modificirovanie poverhnosti stal'nyh izdelij [Vacuum and arc modifying of a surface of steel products] //FIP FIP PSE. 2007. T. 5. №3–4. S. 140–148.
13. Mubojadzhjan S.A. Osobennosti osazhdenija iz dvuhfaznogo potoka mnogokomponentnoj plazmy vakuumno-dugovogo razrjada, sodержashhego mikrokapli isparjaemogo materiala [Features of sedimentation from a two-phase stream of multicomponent plasma of the vacuum and arc category containing microdrops of the evaporated material] //Metally. 2008. №2. C. 20–34.