

УДК 001.891.573:669.295

Н.И. Артеменко¹, В.Н. Симонов²**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ТИТАНА
НА УСТАНОВКЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО
НАПЫЛЕНИЯ МАП-3**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-3-3

Рассмотрена математическая модель процесса осаждения покрытия из двухкомпонентной ионно-капельной плазмы вакуумно-дугового разряда из титанового сплава VT1-0. Установлено, что температура подложки при нанесении покрытия зависит от тока дуги и напряжения смещения. Получено соотношение, из которого следует, что относительное количество микрокапельной фазы в ионно-плазменном покрытии незначительно, но монотонно возрастает с увеличением тока дуги. Установлено, что удельное изменение массы образца при нанесении покрытия зависит от тока дуги, напряжения и продолжительности процесса. Предложены формулы для вычисления температуры подложки и удельного изменения массы образца при ионно-плазменном нанесении покрытия из сплава VT1-0. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и планировании технологического процесса нанесения покрытия на ионно-плазменной установке МАП-3, а также при прогнозировании некоторых свойств полученных ионно-плазменных конденсированных покрытий.

Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных направлений 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионно- и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» и 17.4. «Многослойные защитные покрытия и плазмохимическое оборудование для осаждения защитных и упрочняющих покрытий из газовых потоков плазмы, содержащих прекурсоры элементов синтезируемого покрытия» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: ионно-плазменные конденсированные покрытия, микрокапельная фаза, температура подложки при нанесении покрытия, удельное изменение массы.

A mathematical model of the deposition of a coating from a two-component ion-droplet plasma of a vacuum-arc discharge from an alloy VT1-0 (titanium) is considered. It is established that the temperature of the substrate during coating depends on arc current and bias voltage. A relation is obtained from which it follows that the relative amount of the microdroplet phase in the ion-plasma coating is insignificant, but monotonically increases with increasing arc current. It is established that the specific change in the mass of the sample during coating depends on the arc current, voltage and time of the process. Formulas are proposed for calculating the substrate temperature and the specific change in the sample mass for ion-plasma coating deposition from the VT1-0 alloy. The obtained results can be used in the development and planning of the coating process on the MAP-3 ion-plasma installation, as well as predicting some properties of the obtained ion-plasma condensed coatings.

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

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана [Bauman Moscow State Technical University]; e-mail: bauman@bmstu.ru

Work is executed within implementation of the complex scientific directions 17.3. «Multilayer heat resisting and heat-protective coatings, nanostructural strengthening erosive and corrosion resistant, wear-resistant, anti fretting coatings for protection of details of hot path and the GTD and GTU compressor», 17.4. «Multilayer protecting covers and the plasmochemical equipment for sedimentation of protective and strengthening coverings from the gas streams of plasma containing precursors of elements of the synthesized covering» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: *ion-plasma condensed coatings, microdroplet phase, substrate temperature during coating, specific weight change.*

Введение

В современном авиадвигателестроении все большее внимание уделяется проблеме продления ресурса деталей, увеличению срока службы, повышению надежности и долговечности. Одним из актуальных вопросов является увеличение ресурса деталей авиационной техники при уменьшении их стоимости. С этой целью используются различные защитные и упрочняющие покрытия, которые позволяют продлить ресурс деталей авиационной техники [2–5].

При защите деталей, подверженных различным видам изнашивания (износ при трении, фреттинг-износ, эрозионное изнашивание), используют упрочняющие покрытия. Существуют различные методы нанесения упрочняющих покрытий: атмосферно-плазменный, детонационный, ионно-плазменный методы, различные виды наплавки (газопламенная, лазерная) и др. Особое место занимает ионно-плазменный метод нанесения покрытий. В ВИАМ разработан оригинальный метод получения ионно-плазменных покрытий – ВПТВЭ (вакуумно-плазменная технология высоких энергий). Полученные покрытия отличаются высокой адгезией, хорошим качеством поверхности, высокими эксплуатационными характеристиками [6–15].

При нанесении ионно-плазменных покрытий материал катода испаряется вакуумной дугой и конденсируется на поверхности деталей, образуя плотное, практически беспористое, покрытие. Зачастую при нанесении покрытия методом ионно-плазменного напыления требуется перед планированием технологического процесса заранее установить параметры вакуумной дуги, при которых удельное изменение массы детали, а значит, и толщина покрытия составят необходимую величину. При этом температура подложки при нанесении покрытия не должна превышать определенное значение – это ограничение связано с температурой разупрочнения материала подложки и величиной внутренних напряжений в покрытии [16–20].

В работе представлена математическая модель, описывающая удельное изменение массы образцов в процессе ионно-плазменного нанесения покрытия из технического чистого титана марки ВТ1-0 и температуры подложки в зависимости от технологических параметров процесса.

Материалы и методы

Расчет равновесной температуры детали при нанесении ионно-плазменного покрытия

Стационарное тепловое состояние катода достигается путем получения тепла от вакуумной дуги на поверхности катода, за счет оттока тепла излучением с внешней и внутренней цилиндрических поверхностей и свободного (верхнего) торца катода, а также путем теплопередачи через нижний торец катода.

С учетом того, что величины теплового потока с верхнего торца катода и от теплопередачи через нижний торец пренебрежимо малы в условиях рассматриваемой задачи, уравнение теплового баланса катода имеет вид:

$$I_d \cdot \Delta U = Q \cdot (S_1 + S_2), \quad (1)$$

где I_d – ток дуги, А; ΔU – вольт-эквивалент потерь на катоде, который составляет 9 В; Q – тепловой поток с поверхности катода, Вт/м²; S_1 и S_2 – площадь внутренней и внешней поверхностей катода соответственно, м².

Согласно уравнению Стефана–Больцмана:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_k^4, \quad (2)$$

где ε – коэффициент излучения; σ – постоянная Стефана–Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); T_k – равновесная температура катода.

Площади внутренней и внешней цилиндрических поверхностей катода рассчитываются как:

$$S_{1,2} = \pi \cdot d_{1,2} \cdot h,$$

где $d_{1,2}$ – диаметры внутренней и внешней цилиндрических поверхностей, равные 0,14 и 0,18 м соответственно; h – высота катода, равная 0,34 м.

Соответственно:

$$I_d \cdot \Delta U = \pi \cdot h \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_k^4 \cdot (d_1 + d_2);$$

$$T_k = \sqrt[4]{\frac{I_d \cdot \Delta U}{\pi \cdot h \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (d_1 + d_2)}}, \quad (3)$$

т. е. тепловой поток, направленный с внешней поверхности катода в вакуумную камеру, с учетом выражений (2) и (3) составляет

$$Q = \frac{I_d \cdot \Delta U}{\pi \cdot h \cdot (d_1 + d_2)}. \quad (4)$$

Количество тепла, ушедшего с внешней поверхности катода с помощью излучения, и тепла, полученного мнимой цилиндрической поверхностью на расстоянии $D=550$ мм от оси катода (ось вращения деталей на спутниках планетарного механизма), остается одинаковым – следовательно:

$$Q \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2 \cdot h}{4} = Q_0 \cdot \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h}{4},$$

$$Q_0 = Q \cdot \frac{d_2^2}{D^2},$$

где Q_0 – тепловой поток от излучения катода на оси вращения спутников планетарного механизма.

Тогда тепловой поток на расстоянии $D=550$ мм от оси катода будет рассчитываться как:

$$Q_0 = \frac{I_d \cdot \Delta U \cdot d_2^2}{\pi \cdot h \cdot (d_1 + d_2) \cdot D^2}. \quad (5)$$

Тепловое состояние детали описывается выражением:

$$Q_t + Q_i = Q', \quad (6)$$

где Q_t – тепловой поток от излучения катода, Вт/м²; Q_i – тепловой поток от плотности ионного тока и напряжения, приложенного к детали, Вт/м²; Q' – тепловое излучение с поверхности детали, Вт/м².

С учетом того, что

$$Q_i = Q_0 \cdot \varepsilon = \frac{I_d \cdot \Delta U \cdot \varepsilon \cdot d_2^2}{\pi \cdot h \cdot (d_1 + d_2) \cdot D^2} = \frac{I_d \cdot 9 \cdot \varepsilon \cdot 0,18^2}{3,14 \cdot 0,34 \cdot (0,14 + 0,18) \cdot 0,55^2} = 2,82 \cdot I_d \cdot \varepsilon, \quad (7)$$

получим

$$Q_i = j_i \cdot (U_{см} + U'') \quad (8)$$

и

$$Q' = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_d^4, \quad (9)$$

где j_i – плотность ионного тока, А/м²; $U_{см}$ – потенциал смещения на детали, В; U'' – вольт-эквивалент энергии взаимодействия двухфазного потока плазмы с подложкой, который составляет 100 В.

Равновесная температура подложки с учетом выражений (6)–(9) рассчитывается как:

$$T_d = \sqrt[4]{\frac{j_i \cdot (U_{см} + 100) + 2,82 \cdot \varepsilon \cdot I_d}{\varepsilon \cdot \sigma}}. \quad (10)$$

В выражении (10) контролируемые параметрами являются I_d и $U_{см}$, измеряемыми – T_d и j_i . Следовательно, есть возможность нахождения величины коэффициента излучения ε , – тогда из выражения (10) получаем:

$$\varepsilon = \frac{j_i \cdot (U_{см} + 100)}{\sigma \cdot T_d^4 - 2,82 \cdot I_d}. \quad (11)$$

Плотность ионного тока находится путем деления измеренного ионного тока, приходящего на сечение подложки, перпендикулярной потоку ионов, на площадь сечения детали S (в м²), находящейся в прямой видимости со стороны катода. Температуру поверхности образцов измеряли пирометром СЕМДТ-8863 с точностью измерения $\pm 1,5^\circ\text{C}$ в диапазоне температур $-50 \div +800^\circ\text{C}$ сразу после выключения источника питания установки для исключения возможности «засвета» датчика. Измерения проводили при токе дуги 300, 400, 500, 600 А и нулевом потенциале смещения на катоде из сплава марки ВТ1-0. Результаты измерений и расчетное значение коэффициента излучения по формуле (11) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Плотность ионного тока и температура поверхности в зависимости от тока дуги, расчетное значение коэффициента излучения

Ток дуги, А	Плотность ионного тока, А/м ²	Температура поверхности, °С (К)	Коэффициент излучения
300	30,4	335 (608)	0,44
400	42,0	389 (662)	0,43
500	52,9	435 (708)	0,412
600	63,2	457 (730)	0,439

Среднее значение коэффициента излучения для титана составило:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i}{n} = \frac{0,44 + 0,43 + 0,412 + 0,439}{4} = 0,43. \quad (12)$$

Плотность ионного тока является линейной функцией тока дуги (также функцией коэффициента испарения материала катода, но в данной задаче материал катода

один и тот же) следующего вида: $j_i(I_d)=b \cdot I_d$, где b – коэффициент пропорциональности.

Методом наименьших квадратов определим значение коэффициента b :

$$\begin{aligned}\Sigma(b) &= \sum_{j=1}^n (j_{ij} - b \cdot I_{dj})^2 = \\ &= (30,4 - b \cdot 300)^2 + (42,0 - b \cdot 400)^2 + (52,9 - b \cdot 500)^2 + (63,2 - b \cdot 600)^2 = \\ &= 860000 \cdot b^2 - 180580 \cdot b + 9480,81.\end{aligned}$$

Для нахождения значения коэффициента пропорциональности b , при котором $\Sigma(b)$ принимает минимальное значение, следует взять производную от этой функции и приравнять ее к нулю:

$$\begin{aligned}\frac{d\Sigma(b)}{db} &= \frac{d(860000 \cdot b^2 - 180580 \cdot b + 9480,81)}{db} = 1720000 \cdot b - 180580 = 0; \\ b &= 0,105.\end{aligned}$$

Получена аппроксимирующая зависимость плотности ионного тока от тока дуги с точностью (коэффициентом детерминации) $R^2=0,998$:

$$j_i = 0,105 \cdot I_d. \quad (13)$$

С учетом уравнений (12) и (13) выражение (10) для расчета равновесной температуры детали при нанесении покрытия в двухфазном потоке плазмы вакуумно-дугового разряда для катода из титанового сплава ВТ1-0 принимает вид:

$$T_d = 45,555 \sqrt[4]{I_d \cdot (U_{см} + 111,5486)}. \quad (14)$$

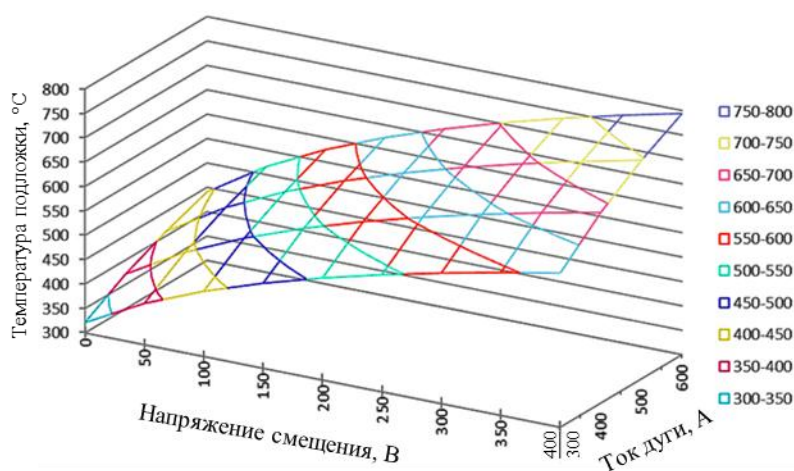


Рис. 1. Температура подложки при напылении в зависимости от тока дуги и напряжения смещения

Зависимость температуры подложки при напылении от тока дуги и напряжения смещения представлена на рис. 1.

Расчет удельного изменения массы образца

Плазма вакуумно-дугового разряда является двухкомпонентной и состоит из положительно заряженных ионов и нейтральных микрокапель испаряемого материала [6]. Пренебрегая током вторичной электронной эмиссии и токопереносом через капельную фазу и считая, что микрокапли при прохождении границы слоя двойного электрического

заряда, отделяющего подложку от плазмы, нейтрализуются, для плотности тока ионов на подложке можно записать:

$$j_i = \frac{Z \cdot e \cdot n_i}{\tau \cdot S}, \quad (15)$$

где $Z=2$ – средняя кратность заряда атома титана в плазме вакуумно-дугового разряда в установке МАП-3; $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; n_i – количество ионов, осевших на подложку; τ – продолжительность осаждения, с; S – площадь поверхности образца, м².

Количество ионов, осевших на подложку, вычисляется как отношение привеса m (в г) за все время осаждения к массе одного иона m_{0Ti} (в г), т. е.:

$$n_i = \frac{m}{m_{0Ti}} = \frac{m \cdot N_A}{\mu_{Ti}},$$

где $N_A=6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро; $\mu_{Ti}=47,9$ г/моль – молярная масса титана.

С учетом того, что $\Delta M_i = m/S$ (в г/м²) – удельное изменение массы образца без учета микрокапельной фазы за все время осаждения, после преобразования уравнения (15) с учетом выражения (13) получаем:

$$\Delta M_i = \frac{0,105 \cdot I_d \cdot \tau \cdot \mu_{Ti}}{Z \cdot e \cdot N_A} = \frac{0,105 \cdot I_d \cdot \tau \cdot 47,9}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,022 \cdot 10^{23}};$$

$$\Delta M_i = 2,61 \cdot 10^{-5} \cdot I_d \cdot \tau. \quad (16)$$

Следовательно, зная реальное удельное изменение массы образца ΔM (в г/м²), полученное гравиметрическим методом, можно вычислить относительное количество ξ микрокапельной фазы в получившемся покрытии:

$$\xi = \frac{\Delta M - \Delta M_i}{\Delta M}. \quad (17)$$

Следует отметить, что формула (16) справедлива при потенциале смещения на детали $U_{см}=0$, тогда как в общем случае следует учитывать, что при наличии потенциала смещения происходит эффект катодного распыления конденсата за счет бомбардировки поверхности ионами с высокой энергией. В связи с этим формула (16) принимает вид:

$$\Delta M_i = 2,61 \cdot 10^{-5} \cdot I_d \cdot \tau \cdot (1 - \Psi), \quad (18)$$

где Ψ – коэффициент распыления.

Данные исследования относительного количества микрокапельной фазы в покрытии из титана в зависимости от тока дуги при нулевом потенциале смещения приведены в табл. 2 (продолжительность осаждения 1 ч).

Таблица 2

Зависимость относительного количества микрокапельной фазы от тока дуги

I_d , А	ΔM_i , г/м ² (расчетное значение)	ΔM , г/м ² (гравиметрический метод)	ξ , %
300	28,2	39,7	0,29
400	37,6	53,4	0,296
500	46,98	67,3	0,302
600	56,4	81,7	0,31

Из данных табл. 2 видно, что относительное содержание микрокапельной фазы незначительно возрастает с увеличением тока дуги. Если предположить, что функция $\xi(I_d)$ является линейной и имеет вид $\xi(I_d)=k \cdot I_d+b$, то методом наименьших квадратов находим коэффициенты k и b :

$$\begin{cases} k \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i; \\ a \sum_{i=1}^n x_i + nb = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases};$$

$$\begin{cases} k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}; \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - k \sum_{i=1}^n x_i}{n} \end{cases};$$

$$\begin{cases} k = 6,6 \cdot 10^{-5}; \\ b = 0,27 \end{cases};$$

$$\xi(I_d) = 6,6 \cdot 10^{-5} \cdot I_d + 0,27. \tag{19}$$

Точность аппроксимации (коэффициент детерминации) составила $R^2=0,9945$.

Для определения коэффициента распыления проведены процессы нанесения покрытия при токе дуги 300, 400, 500 и 600 А и потенциале смещения 0–400 В с шагом 100 В. В табл. 3 приведены данные гравиметрического взвешивания.

Таблица 3

Удельное изменение массы образцов

Ток дуги, А	Напряжение смещения, В	ΔM , г/м ²	$1-\Psi = \frac{\Delta M}{\Delta M} _{U=0}$	Ψ
300	0	39,7	1	0
	100	34,1	0,859	0,141
	200	24,2	0,61	0,39
	300	17,9	0,451	0,549
	400	14,2	0,358	0,642
400	0	53,4	1	0
	100	43,2	0,809	0,191
	200	30,1	0,564	0,436
	300	20,3	0,38	0,62
	400	11,5	0,216	0,784
500	0	67,4	1	0
	100	53,4	0,792	0,208
	200	38,5	0,571	0,429
	300	18,1	0,269	0,731
	400	2,3	0,034	0,966
600	0	81,7	1	0
	100	56,4	0,69	0,31
	200	37,3	0,457	0,543
	300	14,8	0,18	0,82
	400	-10,3	-0,126	1,126

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента распыления от напряжения смещения. Очевидно, что зависимость коэффициента распыления от напряжения смещения можно аппроксимировать линейной функцией вида $\Psi(U_{см})=k \cdot U_{см}$. Методом наименьших квадратов получены выражения, которые представлены в табл. 4.

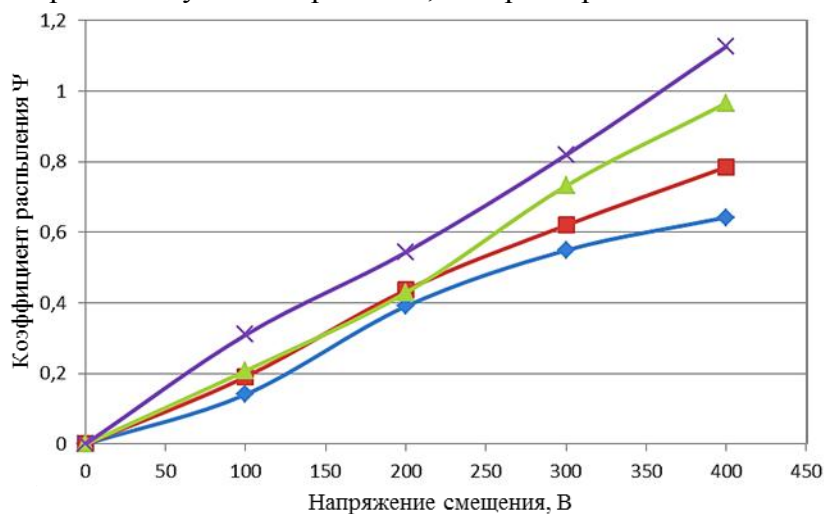


Рис. 2. Зависимость коэффициента распыления от напряжения смещения при токе дуги 300 (♦), 400 (■), 500 (▲) и 600 А (×)

Таблица 4

Коэффициенты распыления, полученные методом наименьших квадратов

Ток дуги, А	Коэффициент k в уравнении $\Psi(U_{см})=k \cdot U_{см}$	Коэффициент детерминации R^2
300	0,00171	0,979
400	0,00202	0,995
500	0,00237	0,994
600	0,00279	0,998

Зависимость коэффициента k в уравнении $\Psi(U_{см})=k \cdot U_{см}$ от тока дуги представлена на рис. 3.

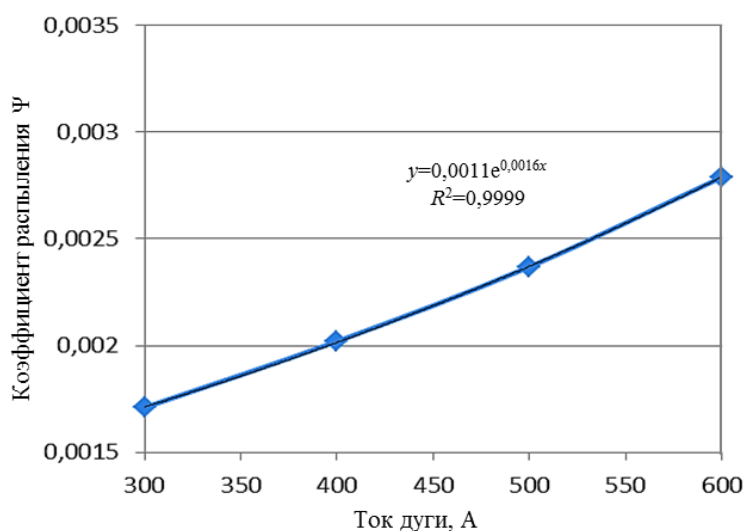


Рис. 3. Зависимость коэффициента распыления (♦) от тока дуги (— экспоненциальная кривая)

Методом экспоненциальной аппроксимации получено выражение зависимости коэффициента k в уравнении $\Psi(U_{\text{см}})=k \cdot U_{\text{см}}$ от тока дуги с точностью (коэффициентом детерминации) $R^2=0,9999$:

$$k=0,0011 \cdot \exp(0,0016 \cdot I_{\text{д}}). \quad (20)$$

В связи с этим выражение (16) с учетом (17)–(20) принимает вид:

$$\Delta M = \frac{2,61 \cdot 10^{-5} \cdot I_{\text{д}} \cdot \tau \cdot (1 - 0,0011 \cdot \exp(0,0016 \cdot I_{\text{д}})) \cdot U_{\text{см}}}{(0,73 - 6,6 \cdot 10^{-5} \cdot I_{\text{д}})}. \quad (21)$$

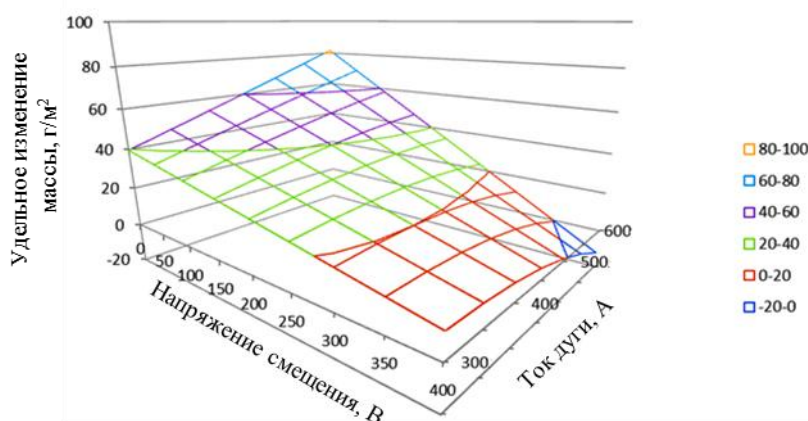


Рис. 4. Зависимость удельного привеса от тока дуги и напряжения смещения при ионно-плазменном напылении

Зависимость удельного изменения массы детали при нанесении покрытия на установке ионно-плазменного напыления покрытий МАП-3 при вакуумно-дуговом распылении катода из сплава ВТ1-0 в течение 60 мин от тока дуги и напряжения смещения на детали, рассчитанного по формуле (21), представлена на рис. 4.

Результаты

В результате проведенного исследования установлено, что основными технологическими параметрами при оценке температуры подложки при ионно-плазменном нанесении покрытия являются ток дуги и напряжение смещения, а при оценке удельного изменения массы образца – ток дуги, напряжение смещения и продолжительность процесса. Такие расчеты могут быть полезны, например, при оценке внутренних напряжений в конденсированных однослойных ионно-плазменных покрытиях, которые производят по формулам:

$$\sigma = \frac{E_{\text{п}}}{1 - \nu_{\text{п}}} (\alpha_{\text{п}} - \alpha_{\text{м}}) \Delta T \quad [21], \quad (22)$$

$$\sigma = \frac{(T_{\text{м}} - T_{\text{п}})}{(T_{\text{м}} - 500)} \cdot \frac{0,0135 \Delta T}{(T_{\text{п}} - 500 - 0,0135 \Delta T)} \cdot \frac{E_{\text{п}}}{1 + \frac{E_{\text{п}} \cdot h_{\text{п}}}{E_{\text{м}} \cdot h_{\text{м}}}} \quad [18], \quad (23)$$

где $E_{\text{п}}$, $E_{\text{м}}$ – модуль упругости материала покрытия и основы соответственно, МПа; $T_{\text{п}}$, $T_{\text{м}}$ – температура плавления материала покрытия и основы соответственно, К; ΔT – разница температур нанесения покрытия и измерения внутренних напряжений, К; $\alpha_{\text{п}}$, $\alpha_{\text{м}}$ – температурный коэффициент линейного расширения материала покрытия и основы соответственно, K^{-1} ; $\nu_{\text{п}}$ – коэффициент Пуассона материала покрытия; $h_{\text{п}}$, $h_{\text{м}}$ – толщина покрытия и основы соответственно, мкм.

В данном случае величина ΔT может быть представлена в виде:

$$\Delta T = 45,555 \sqrt[4]{I_d \cdot (U_{cm} + 111,5486)} - 300,$$

а величина $h_{п}$ рассчитана как

$$h_{п} = \frac{\Delta M}{\rho} = \frac{2,61 \cdot 10^{-5} \cdot I_d \cdot \tau \cdot (1 - 0,0011 \cdot \exp(0,0016 \cdot I_d)) \cdot U_{cm}}{(0,73 - 6,6 \cdot 10^{-5} \cdot I_d) \cdot \rho},$$

что делает формулы (22) и (23) более универсальными (где ρ – плотность осаждаемого материала).

Обсуждение и заключения

В результате рассмотрения процесса осаждения покрытия из двухкомпонентной плазмы вакуумно-дугового разряда из титанового сплава ВТ1-0 получены следующие результаты:

– установлено, что температура подложки при нанесении покрытия зависит от величины тока дуги и напряжения смещения, относительное количество микрокапельной фазы в покрытии незначительно возрастает с увеличением тока дуги и удельное изменение массы образца при нанесении покрытия зависит от тока дуги, напряжения и продолжительности процесса.

– предложены формулы для вычисления температуры подложки и удельного изменения массы детали при ионно-плазменном нанесении покрытия из титанового сплава ВТ1-0.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и планировании технологического процесса нанесения покрытия на ионно-плазменной установке МАП-3, а также при прогнозировании некоторых свойств полученных ионно-плазменных конденсированных покрытий.

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. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 57–60.
4. 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.
5. 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. №5. С. 71–81.
6. Мубояджян С.А. Особенности осаждения потока многокомпонентной плазмы вакуумно-дугового разряда, содержащего микрокапли испаряемого материала // *Металлы*. 2008. №2. С. 20–34.
7. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Защитные жаростойкие покрытия для сплавов на основе интерметаллидов никеля // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №2. С. 12–15.
8. 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.

9. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Степанова С.В. Ионно-плазменные жаростойкие покрытия с композиционным барьерным слоем для защиты от окисления сплава ЖС36ВИ // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. №1. С. 34–40.
10. Гаямов А.М. Жаростойкое покрытие с композиционным барьерным слоем для защиты внешней поверхности рабочих лопаток ГТД из ренийсодержащих жаропрочных никелевых сплавов // *Физико-химия и технология неорганических материалов: сб. матер. XI Рос. ежегод. конф. молодых научных сотрудников и аспирантов*. М.: ИМЕТ РАН, 2012. С. 473–475.
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. Способ обработки поверхности металлического изделия: пат. 2368701 Рос. Федерация; опубл. 27.09.09.
13. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Металлы*. 2012. №1. С. 5–13.
14. Способ нанесения комбинированного жаростойкого покрытия: пат. 2402633 Рос. Федерация; 31.03.09.
15. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Космин А.А. Жаростойкие ионно-плазменные покрытия для лопаток турбин из никелевых сплавов, легированных рением // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2008. №6. С. 31–36.
16. 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. Сер.: Машиностроение*. 2011. №2. С. 26–37.
17. Будиновский С.А. Применение аналитической модели определения упругих механических и термических напряжений в многослойной системе в решении задач по созданию жаростойких алюминидных покрытий // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2013. №3. С. 3–11.
18. Артеменко Н.И., Мубояджян С.А. Инженерная методика оценки величины и характера внутренних напряжений в однослойных упрочняющих конденсированных покрытиях // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №1. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-4-4.
19. Артеменко Н.И., Симонов В.Н. Инженерная методика прогнозирования величины модуля упругости однослойных ионно-плазменных конденсированных покрытий, полученных методом плазмохимического синтеза // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №7. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-5-5.
20. Александров Д.А., Артеменко Н.И. Износостойкие покрытия для защиты деталей трения современных ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №10. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-6-6.
21. Bielawski M. Residual stress control in TiN/Si coatings deposited by unbalanced magnetron sputtering // *Surface Coating Technologies*. 2006. Vol. 200. P. 3987–3995.