

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ОПИСЫВАЮЩАЯ ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗДЕЛИЙ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ НА ИХ ПОВЕРХНОСТИ

Магнетронные распылительные системы широко применяются при производстве авиакосмической техники для нанесения покрытий на поверхности изделий с целью придания им требуемых физических свойств [1].

Одним из основных достоинств магнетронного распыления является возможность изменять и контролировать в широком диапазоне параметры технологического процесса: плотность ионного тока на подложку и энергию бомбардирующих ионов.

Увеличение скорости осаждения возможно за счет увеличения плотности и энергии ионного потока на катод-мишень, что в свою очередь приводит к росту температуры на его поверхности.

Повышение температуры подложки может активировать фазовые переходы в структуре материала подложки и значительно сократить или увеличить ее эксплуатационный ресурс (температура отпуска аустенитной стали порядка 400 К) [2].

Целью данной статьи является разработка математической модели изменения температуры изделия (подложки) и катода-мишени в процессе нанесения покрытия в магнетронных распылительных системах в установившемся режиме. Численное решение математической модели позволит выбирать и назначать режимы нанесения покрытия, что в свою очередь позволит формировать покрытие высокого качества со стабильными значениями адгезионной прочности без изменения свойств подложки.

Как правило, в магнетронных распылительных системах используют аномальный тлеющий разряд, горящий в скрещенных электрическом и магнитном полях при давлениях $P = 0,1 \dots 1,5$ Па и величинах магнитной индукции $B = 0,01 \dots 0,05$ Тл. Таким образом, все поверхности подвержены влиянию излучения из плазмы (q_{ext}), теплового потока приносимого на поверхности электродов частицами (нейтральными частицами, ионами и электронами (q_{cp})), теплового потока от других поверхностей разрядного промежутка (q_m). А отвод тепла со всех поверхностей разрядного промежутка происходит за счет излучения (q) и теплопроводности (q_h).

Тепловой поток, приносимый нейтральными частицами, на поверх-

ности электродов незначительный по сравнению с потоком энергии от ионов. В ряде работ [3, 4] показано, что он не превышает 1 % от энергии падающих ионов.

Теплоотвод с катода-мишени осуществляется за счет излучения, термоэмиссии электронов с поверхности, распыления материала катода-мишени (q_p) и ион-электронной эмиссии с поверхности катода-мишени в результате ионной бомбардировки.

Как правило в магнетронных распылительных системах температура катода-мишени не достигает $0,7 \cdot T_{пл}$, где $T_{пл}$ – температуры плавления материала [5]. Поэтому процесс термоэмиссии не оказывает вклада в сброс тепла с катода-мишени.

Процесс ион-электронной эмиссии не учитывается в последующем расчете. Это связано с тем, что энергия вторичных электронов не превышает 5 эВ, а коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии для технологического газа (как правило, применяется аргон) не превышает 0,2 [6].

Дополнительное количество тепла выделяется на подложке за счет адсорбции и химических реакций на поверхности подложки. Энергией адсорбции и химических реакций на поверхности подложки можно пренебречь с учетом того, что технологический процесс выполняют при низких давлениях в камере с использованием инертного технологического газа высокой степени чистоты.

На рисунке 1 представлен баланс тепловых потоков на катод-мишень (а) и подложку (б) исходя из вышеизложенного анализа.

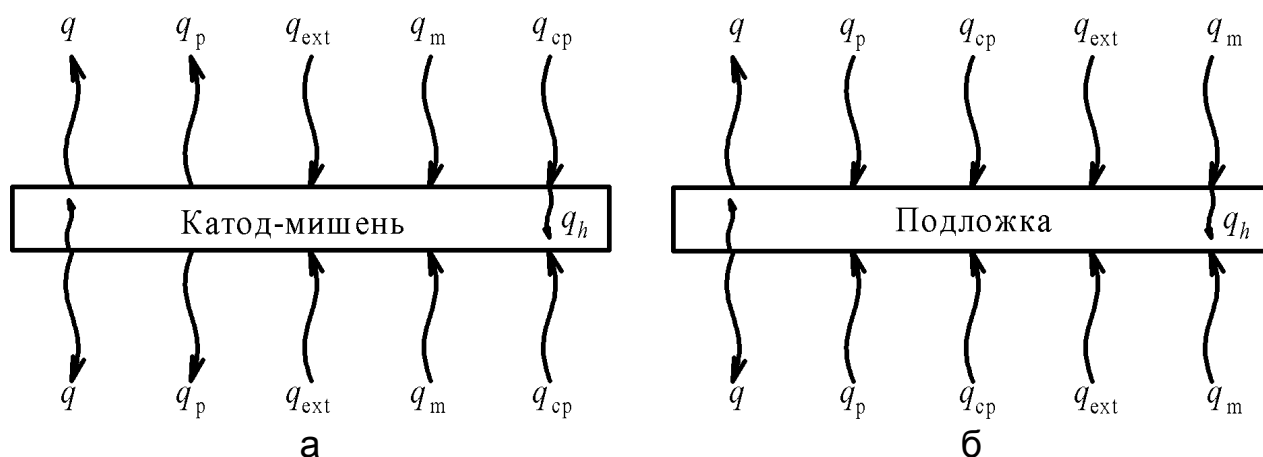


Рисунок 1 - Схема распределения тепловых потоков по катод-мишени (а) и по подложке (б)

Рассмотрим уравнение теплопроводности [7]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q,$$

где ρ – плотность, C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, T – абсолютная температура, $\mathbf{u}$ – вектор скорости, k – коэффициент теплопроводности, Q – объемный тепловой поток из плазмы.

Для определения объемного теплового потока за счет излучения из плазмы использовалась жидкостная модель плазмы, приведенная в работе [8]. Излучение из плазмы связано со следующими элементарными процессами (реакциями), происходящими в ней: возбуждение, прямая и ступенчатая ионизация, сброс возбуждения, ионизация Пеннинга, метастабильное гашение. Тепловой поток определялся как сумма тепловых потоков каждой химической реакции в плазме (см. ур-ние 1) [9].

$$Q = \sum_{j=1}^7 r_j (F_c \cdot \Delta \omega_j - H_j), \quad (1)$$

где F_c – постоянная Фарадея, H_j – энтальпия j -ой реакции.

Скорость j -ой реакции r_j , энтальпия j -ой реакции H_j , потеря энергии во время j -ой реакции $\Delta \omega_j$, определялись с помощью жидкостной модели.

С учетом того, что потенциал ионизации аргона существенно выше, чем работа выхода у материалов, применяемых для изготовления подложки (первый потенциал ионизации для атома аргона 15,76 эВ, а для атома титана – 3,95 эВ), потенциальную энергию ионов можно не учитывать [10].

Кинетическая энергия может достигать значений порядка $eU_{TKП}$, где e – элементарный заряд, $U_{TKП}$ – величина падения потенциала в темном катодном пространстве [11].

Механизм передачи кинетической энергии определяется процессами столкновения. Часть кинетической энергии E_i^{tr} передающаяся на электрод, зависит от соотношения масс сталкивающихся частиц (M_1 , M_2), угла падения (θ) и коэффициента передачи энергии (k_c) и определяется по формуле [12]:

$$E_i^{tr} = 4k_c \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} E_{i,kin} (\sin \theta / 2)^2.$$

Коэффициент передачи кинетической энергии k_c равен единице для парных упругих столкновений, а для столкновения каскадов ионов с поверхностью твердого тела может быть принят равным 0,7 [13].

Угол падения иона аргона на поверхность катода-мишени принимается из условия, что ион летит по нормали к поверхности катода-

мишени вдоль силовых линий электрического поля [14]. Распределение силовых линий электрического поля получено с помощью жидкостной модели плазмы, и приведено в работе [8]

На основании вышеизложенного, тепловой поток за счет ионной и электронной бомбардировки электродов определялся по формуле (2).

$$q_{cp} = \frac{E_i^{tr} \cdot j_i}{e} + \frac{E_e \cdot j_e}{e}, \quad (2)$$

где E_i – энергия ионов, E_e – энергия электронов.

Плотность ионного тока на катод-мишень определялась с помощью жидкостной модели плазмы. В результате решения системы уравнений жидкостной модели получено, что возле плоскости симметрии есть резкий максимум по плотности ионного тока, который связан с особенностями программы расчета [15].

Поэтому для избежания значительных ошибок в тепловой модели, определения температуры электродов в аномальном тлеющем разряде, начальный участок распределения плотности тока по длине катода мишени аппроксимирован к результату полученному экспериментальным путем.

Тепловой поток, который уносится с единицы поверхности катода-мишени распыленными частицами, определялся по формуле (3).

$$q_p = J_p \cdot E_p, \quad (3)$$

где J_p – плотность потока распыленных частиц, E_p – энергия распыленных частиц.

Плотность потока распыленных частиц с единицы поверхности определялась в соответствии с работой [11].

Энергия распыленных частиц в магнетронных распылительных системах обычно изменяется в пределах 20...100 эВ [16].

Тепловой поток, который приносится на единицу поверхности электродов распыленными частицами определялся по формуле:

$$G_{ip} = J_{ip} \cdot E_p,$$

где J_{ip} – плотность потока распыленных атомов приходящих на электроды.

Плотность потока распыленных атомов на единицу поверхности электродов с источника dS_p поверхности распыления S_p определялась по формуле [17]:

$$J_{ip} = \int_{S_p} \frac{J_p}{\pi} \frac{d^2}{(r^2 + d^2)^2} dS_p,$$

где d – длина нормали, проведённой от поверхности катода-мишени к электроду; r – расстояние от источника dS_p к точке на электроде, в которой необходимо определить поток частиц материала покрытия.

Ток заряженных частиц на подложку, во время нанесения покрытия не превышал нескольких миллиампер, в то время как на катод ток достигает величин порядка одного ампера. Таким образом нагрев подложки за счет бомбардировки заряженными частицами можно не учитывать.

Таким образом граничные условия для электродов примут вид:

$$-n \cdot (-k \nabla T) = \varepsilon (q - \sigma T^4),$$

$$q = q_m(J) + F_{amb} \sigma T_{amb}^4 + q_{ext} + q_{cp} + k_1 q_p,$$

$$(1 - \varepsilon) q = J - \varepsilon \sigma T^4,$$

где n – внешняя нормаль, q – тепловой поток, излучаемый с единицы поверхности, ε – коэффициент излучения, σ – постоянная Стефана-Больцмана, J – собственный поток теплового излучения, F_{amb} – геометрический фактор передачи энергии от области излучения к области поглощения на поверхности электрода, T_{amb} – температура окружающей среды, $k_1 = -1$ – для электродов под нулевым потенциалом, $k_1 = 1$ – для электродов под высоким положительным потенциалом.

Так как предложенная математическая модель осесимметричная, тогда условие неразрывности для плоскости и оси симметрии имеет вид:

$$n \cdot (-k \nabla T) = 0.$$

Выводы

Проведена постановка тепловой задачи на основании процессов, и их вклада в изменение температуры подложки и катода-мишени, в аномальном тлеющем разряде при давлениях $P = 0,1 \dots 1,5$ Па и величинах магнитной индукции $B = 0,01 \dots 0,05$ Тл.

На основании ранее разработанной жидкостной модели плазмы предложена математическая модель, позволяющая проводить численный эксперимент по определению температуры подложки, катода-мишени и в дальнейшей работе назначать режимы нанесения покрытий.

Список использованных источников

1. Tribological performance of hybrid filtered arc-magnetron coatings Part I: Coating deposition process and basic coating properties characterization [Text] / V. Gorokhovskiy and [others] // Surface & Coatings Technology. – 2006. – V. 201. – P. 3732 – 3747.
2. Инструментальные стали [Текст] : справочник / Л. А. Поздняк [и др.]. – М. : Металлургия, 1977. – 168 с.
3. Rossnagel, S. M. Film modification by low energy ion bombardment during deposition [Text] / S. M. Rossnagel, J. J. Cuomo / Thin Solid Films. – 1989. – V. 171, No. 1. – p. 143 – 156.
4. Muller, K. H. Modelling Ion-Assisted Deposition of CeO_2 Films [Text] / K. H. Muller // Appl. Phys. A. – 1986. – V. 40. – p. 209-213.
5. Magnetron sputtering technique used for coatings deposition; technologies and applications [Text] / D. G. Constantin and others // 7th International Conference on Materials Science and Engineering – BRAMAT 2011, Braşov, 24 – 26 February 2011. – 2011. – P. 29 – 33.
6. Variation du coefficient d'émission électronique secondaire de quelques métaux avec l'énergie des ions incidents [Text] / M. P. Cousinie and others // Comptes Rendus des Seances de L'academie des Sciences. – 1959. – V. 249. – P. 387 – 389.
7. Krotz, H. Experimental investigation and simulation of heat flux into metallic surfaces due to single discharges in micro-electrochemical arc machining (micro-ECAM) [Text] / H. Krotz, R. Roth, K. Wegener // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2013. – V. 68, No. 5-8. – P. 1267 – 1275.
8. Computer simulation of abnormal glow discharge processes in crossed electric and magnetic fields [Text] / A. V. Isakov, V. P. Kolesnik, A. M. Okhrimovskyy and others // Probl. of atom. sci. and tech. – 2014. – V. 94, № 6. – P. 171 – 174.
9. Baki, M. C. Review of Modeling of Liquid Precursor Droplets and Particles Injected into Plasmas and High-Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Flame Jets for Thermal Spray Deposition Applications [Text] / M. C. Baki, S. Basu // J. Thermal Spray Tech. – 2009. – V. 18. – P. 769 – 793.
10. Грановский, В. Л. Электрический ток в газе. Том 1. Общие вопросы электродинамики газов [Текст] / В. Л. Грановский. – М. : Госю изд-во технико-теор. лит., 1952. – 433 с.
11. Данилин, Б. С. Магнетронные распылительные системы [Текст] / Б. С. Данилин, В. К. Сырчин. – М. : Радио и связь, 1982. – 72 с.
12. Беграмбеков, Л. Б. Процессы в твердом теле под действием ионного и плазменного облучения [Текст] : Учебное пособие / Л.Б. Беграмбеков. – М. : МИФИ, 2008. – 168 с.
13. Bang, K. The effect of substrate surface temperature on the morphology and quality of diamond films produced by the oxyacetylene combustion method [Text] / K. Bang, A. J. Ghajar, R. Komanduri // Thin Solid Films. –

1994. – V. 238, No. 2. – p. 172 – 183.

14. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда [Текст] / Ю. П. Райзер. – 3-е изд. перераб. и доп. – Долгопрудный : Издательский дом «Интеллект», 2009. – 736 с.

15. Определение параметров плазмы в аномальном тлеющем разряде в скрещенных электрическом и магнитном полях / А. В. Исаков, В. П. Колесник, А. М. Охримовский и др. [Текст] // Журнал «Авиационно-космическая техника и технология». – 2015. – с. 30 – 35.

16. Данилин, Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок [Текст] / Б. С. Данилин. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 328 с.

17. Contino, A. Modelling of continuous steel coating by self-induced ion plating (SIIP) [Text] / A. Contino, V. Feldheim, P. Lybaert. – Paris, 2005 Comsol Multiphysics User's Conference p. 1-5.

Поступила в редакцию 23.04.2015.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. Е. Зайцев,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*