

doi: 10.32620/oikit.2024.100.07

УДК 538.95

Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв,
О. В. Торосян, П. Р. Жидєєв

Теоретичне дослідження теплових процесів на вуглецевих електродах в результаті дії плазми при генерації наноструктур у вакуумній дузі

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна*

Допрацьовано математичну модель для визначення теплофізичних та термомеханічних процесів на електродах при плазмовому формуванні наноструктур. В моделі враховано дії електродних плям, випарювання, розпилення та температурні напруження у тілі електродів. Проведено розрахунки розподілу температур на поверхнях графітового катоду та аноду з урахуванням умов необхідних для отримання наноструктур. Проведено аналіз теплофізичних процесів на поверхнях графітового катоду та аноду під час виходу на робочий режим. Також за зміною геометрії електродів було визначено стійкість електродів при плазмовій генерації наноструктур. Розрахунки температурних полів на торцевій поверхні катоду з графіту показали, що при постійному рості температури поверхні катоду характер її розподілення принципово не змінюється. Розрахунок температурних полів за радіусом графітового катоду, у різні моменти часу при виході на робочий режим показав незначний вплив випаровування на зміну геометрії катоду. Визначення температурних полів вздовж твірної аноду показало найбільший вплив випаровування на малій ділянці аноду найближче розташованої до катоду. Отримано залежності діючих напружень від температури для графітового катоду та аноду. Дослідження динаміки зміни температурних напружень на електродах під час формування наноструктур у плазмовому середовищі свідчать про те, що значення температурних напружень віддалені від межі міцності матеріалу. Проведено теоретичне дослідження теплофізичних та термомеханічних процесів на графітовому катоді та порівняння з експериментальними вимірюваннями. Розрахунок ресурсу електродів під час створення вуглецевих наноструктур у плазмовому середовищі склав $2.52 \cdot 10^5$ с. Експериментальний ресурс графітового катоду складає $2.88 \cdot 10^5$ с, що досить близько до розрахункового значення. Збіг отриманих значень теоретичних та експериментальних результатів говорить про працездатність розробленої моделі. Стаття може бути цікава при проектуванні устаткування для отримання наноструктур у плазмовому середовищі та для подальших досліджень фізичних параметрів електродів.

Ключові слова: температура, тепловий потік, температурні напруження, електроди, електродні плями, наноструктури.

Вступ

Постійний інтерес дослідників до вакуумної дуги обумовлений різними, раніше нам відомими, напрацюваннями. Використання її як джерела високоіонізованої металевої плазми для осадження тонких плівок [1, 2], генерації лазерної плазми [3] та джерела покращення якості космічних плазмових двигунів [4, 5]. Проте зараз особливо цікаве використання дуги у різних сферах нанотехнологій [6,7], наприклад, при створенні нанокомпозитних та наноструктурованих плівок [8], наноструктурованих покриттів [9, 10] на основі алмазоподібного вуглецю та легованого золотом вуглецю [11], вирощуванні кремнієвих нанотрубок [12] та багато чого іншого.

Процеси, які проходять у плазмовому середовищі вакуумної дуги, за останній час розглянуті достатньо широко. Так [9] було розглянуто катодні та

анодні процеси з холодними та гарячими електродами та деякі процеси в міжелектродній плазмі. У випадку з холодними електродами - це механізм безперервності струму та характер формування струменя плазми в плямах й падіння катодного потенціалу. Для гарячих електродів проаналізовано механізм нерозривності дифузного струму та запропоновано модель для розрахунку частки електронного струму в розряді з катодно-аномальним випромінюванням електрона. При роботі дуги у поперечному магнітному полі [10, 11] було розглянуто групування катодних плям та ретроградний рух катодної плями. Проводився розгляд еволюції вакуумної дуги з наносекундним дозволом [12], який підтвердив, що канал між електродами створюється у формі катодної плазми задовго до того, як в аноді розвинеться якась значна активність. Було розглянуто циклічний характер процесів катодних плям та показано самопідтримуючі властивості дуги за рахунок вибухової емісії. Також було розроблено статистичну модель вакуумної дуги для опису ефекту самовільного гасіння [13]. Для опису процесу створення та розвитку кратеру катодної плями вакуумної дуги було розроблено двовірну вісесиметричну модель [14, 15], яка складається з гідродинамічних рівнянь та рівнянь теплопередачі, що враховують поверхневе випарювання та джоулів підігрів. Моделювання перехідних процесів розширення прикатодної плазми [16] показало, що при щільності струму нижче 109 A / cm^2 розліт плазми має автотельний характер, а при більших значеннях щільності струму носить суттєво нестационарний характер. Розглядалися і окремі фізичні властивості електродів при роботі вакуумної дуги. Так у [17, 18] розглянуто еволюцію температури аноду у вакуумній дузі при використанні темнотільних електродів. Також досліджувалась втрата матеріалу електродами у вигляді пари, завдяки створенню струменів у катодних плямах при високих значеннях іонного струму [19]. Вимірювалась щільність іонного току у вакуумній дузі з різною товщиною тугоплавкого аноду [20,21].

Значно менше досліджувались процеси на електродах вакуумної дуги при формуванні наноструктур у плазмовому середовищі. Так у [22, 23] розглянуто розподіл іонного струму на підкладці під час формування наноплівки у плазмовому середовищі. Дослідження розподілу щільності іонного струму на підкладці з переривчастою плівкою, яка складалась з нанокластерів розміром 25-100 нм, показали, що функцією розподілу нанокластерів можна керувати шляхом зміни напруги зміщення. Проведено дослідження впливу електричних та магнітних полів, виникаючих при синтезі одностінних вуглецевих нанотрубок у дуговій плазмі [24]. У [25, 26] проведено дослідження поведінки дугових плям на зразках наноструктурованого вольфраму з різною товщиною наноструктурованого шару, яке показало, що ширина сліду дуги збільшується зі збільшенням товщини наноструктурованого шару. В той же час у [27] було експериментально досліджено вплив товщини наноструктурованого шару на поверхні вольфрамового катоду на його фізичні властивості. Також проводились дослідження швидкості дуги та ерозії, але тільки на наноструктурованих мідних катодах [28].

Проведений вище аналіз говорить про актуальність дослідження процесів на графітових катодах, з метою вивчення його фізичних властивостей для можливості формування вуглецевих наноструктур. Для цього потрібна математична модель, яка буде враховувати не тільки теплофізичні процеси, але і термомеханічні процеси у тілі електродів. За допомогою цієї моделі можливо буде провести дослідження процесів, які впливатимуть на стійкість електродів

вакуумної дуги при генерації наноструктур у плазмовому середовищі, на прикладі вуглецевих електродів. Ці дослідження можуть бути цікаві при проектуванні устаткувань для генерації наноструктур у плазмовому середовищі.

1. Основна частина

1.1. Теоретичний розгляд теплових потоків діючих на електроди, під час випромінювання плазми при генерації вуглецевих наноструктур

Як було показано у [3, 29] на стійкість електродів під час випромінювання плазми впливають термомеханічні процеси, теплофізичні та процеси зіткнення. Теплофізичні процеси розглядають, зазвичай, у електродних плямах, як осередки ерозійних процесів, де випаровування та викид матеріалів у рідкій фазі призводить до зміни геометрії електродів та механічних властивостей матеріалів [796]. Термомеханічні процеси, як результат теплофізичних процесів, визначають характер виникаючих температурних напружень. Ці напруження можуть приводити до зміни геометрії електродів внаслідок термопружного деформування матеріалів або до термосталісних змін механічних властивостей матеріалу при досить тривалій їхній дії. Процеси зіткнення виникають внаслідок взаємодії заряджених часток з матеріалом електродів, що призводять до зміщення атомів та розпиленню матеріалу електродів. Але як було показано у [30, 31], ці процеси також можна описати теплофізичними методами.

З [27, 32] та проведеного вище розгляду процесів видно панівний вплив теплофізичних та термомеханічних процесів. При дослідженні зміни фізичних параметрів електродів під час формування наноструктур у плазмовому середовищі особливо цікаво визначення впливу термомеханічних процесів [33, 34]. Тому знання полів температури в об'ємі електродів під час дії плазми при генерації вуглецевих наноструктур є визначальним. Характер розподілу температури за довжиною електродів та діючих температурних напружень визначимо через розв'язання сумісної задачі теплопровідності та термопружності.

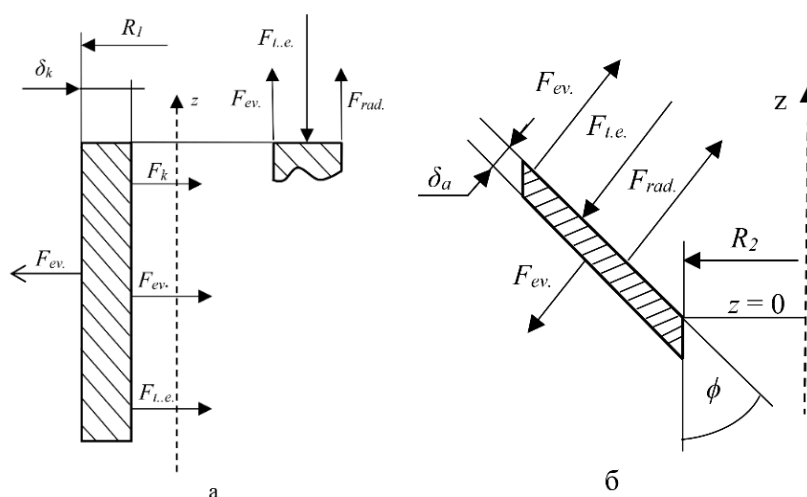


Рисунок 1 – Схема дії теплових потоків на катод (а) та анод (б) під час дії плазми при генерації наноструктур.

Тепловий потік, який діє на електроди у плазмовому середовищі

складається з теплопровідності (перша складова), зміщення фронту випарювання (друга складова), джоуліву нагріву (третья складова) та енергію деформування (четверта складова). У загальному вигляді рівняння буде мати наступний вид:

$$\Delta \frac{dT(r,z,t)}{dt} = \alpha[T] \Delta T(r,z,t) + V_{f1} \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} \Big|_1 - V_{f2} \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} + \frac{\rho[T(r,z,t)]}{C_v[T(r,z,t)]} \cdot j^2(r,z,t) + \frac{1}{C_v} \frac{\partial W(r,z,t)}{\partial t}, \quad (1)$$

де $\Delta T(r,z,t) = \frac{\partial^2 T(r,z,t)}{\partial^2 r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r,z,t)}{\partial^2 z}$, – лапласіан теплового потоку,

α – коефіцієнт температуропровідності, V_{f1} та V_{f2} – швидкість зміщення фронту випарювання, $\rho[T]$ – питомий електричний опір при температурі T , а $j(r,z,t)$ – щільність струму з урахуванням його розтікання, $W(r,z,t)$ енергія деформації одиниці цільового об'єму.

Залежність лапласіана теплового потоку тільки від z та r обумовлена прийняттям кутової симетрії елементарного об'єму електроду.

Опишемо граничні умови для катоду (Рис.1а):

на поверхні $r = R1$

$$-\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} = \frac{(-F_{ev} - \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4(r,z,t) - F_k)}{\lambda}, \quad (2)$$

де F_{ev} – тепловий потік від випарювання, λ – теплопровідність,

F_k – загальний тепловий потік на катоді;

на поверхні $r = R1 + \delta_k$

$$-\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} = \frac{-F_{ev}}{\lambda}, \quad (3)$$

на поверхні $z=l$

$$-\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} = \frac{F_k - F_{ev} - \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4(r,z,t)}{\lambda}, \quad (4)$$

де σ – постійна Стефана-Больцмана, ε – ступінь чорноти мішені,

$T(r,z,t)$ – температура середовища;

на поверхні $z=0$

$$-\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} = \frac{F_k}{\lambda} \quad (5)$$

Граничні умови для аноду (Рис.1б) будуть наступні:

на поверхні $r = R2 + z \operatorname{tg} \varphi$

$$-\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} = \frac{F_k - F_{ev} - \sigma \cdot (\varepsilon T^4(r,z,t) - \varepsilon_s T_s^4)}{\lambda}, \quad (6)$$

де F_{ta} – загальний тепловий потік на аноді ε_s – початкова ступінь чорноти мішені,

T_s – початкова температура середовища

на поверхні $r = R2 + \delta_a$

$$-\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial z} = -\frac{F_{ev}}{\lambda}, \quad (7)$$

на поверхні $z = L \cdot \operatorname{ctg} \varphi = z_k$

$$-\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial z} = \frac{(-F_{ev} - \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4(r,z_k,t))}{\lambda}, \quad (8)$$

на поверхні $z = 0$

$$-\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} = \frac{F_{ta}}{\lambda}, \quad (9)$$

Щільність струму у досліджуваному перетині катоду вважаємо постійною, а у матеріалі аноду визначаємо наступним чином:

$$j(z, t) = \sum_{i=1}^m I_n \cdot N(z, t) \frac{1}{2\pi(R_2 + z \cdot \operatorname{tg} \phi) \cdot \delta_a}, \quad (10)$$

де R_2 – радіус аноду, δ_a – товщина утворюючої аноду, ϕ – кут нахилу утворюючої аноду.

1.2. Аналіз задачі термопружності в електродах у плазмовому середовищі

У зв'язку з тим, що задачі термопружності на катодах при генерації наноструктур у плазмовому середовищі подібні [15, 34], то представимо катод як циліндричну оболонку.

Тоді для нього буде справедлива наступна система диференціальних рівнянь:

$$-\frac{\partial^2 x}{\partial r^2} = -\frac{q}{b} + \alpha(1 + \mu) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right), \quad -\frac{\partial^2 z}{\partial r^2} = \frac{E\delta^3}{R(1 - \mu)} \left(\frac{x}{R} + \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right), \quad (11)$$

де $q = \int_{-\delta/2}^{\delta/2} \sigma_{rz} dr$ – поперечна сила, яка діє на одиницю довжини твірної

циліндра; $x = \frac{d\omega}{dz}$ – зміна кута нахилу дотичної до твірної циліндра;

$b = \frac{E\delta^3}{R(1 - \mu)}$ – жорсткість при вигині; α – коефіцієнт лінійного розширення;

μ – коефіцієнт Пуассону для матеріалу катоду.

Приймаємо, що температурні поля мають осьову симетрію. Тому граничні умови для (11) будуть наступні:

на поверхні $R = R_1$

$$q = 0, x = 0 \quad (12)$$

на поверхні $R = R_1 + \delta_k$

$$q = 0, x = 0 \quad (13)$$

на поверхні $z = L, \sigma_{zz} = 0$

$$q = 0, \frac{dx}{dz} = 0 \quad (14)$$

на поверхні $z = 0$

$$q = 0, \frac{dx}{dz} = 0 \quad (15)$$

Вирішуючи рівняння (11) з граничними умовами (12) – (15), знаходимо значення q та x . Визначивши їх і враховуючи коефіцієнти ерозії [29, 35], знаходимо напруження:

$$\sigma_{vv} = \frac{dx}{dz} = -R \frac{d^2 q}{dr dz}; \quad \sigma_{zz} = -\frac{1}{2} \frac{dm_z}{dz} = b \frac{d}{dr} \left[\frac{dx}{dz} - \alpha(1 + \mu) \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right]; \quad \sigma_{zz} = -\frac{dq}{dr}, \quad \sigma_{rz} = 0. \quad (16)$$

Виходячи з малої товщини кінцевого аноду, задачу термопружності будемо вирішуємо як для кінцевої оболонки, тому буде справедлива система рівнянь

термопружності [27]:

$$R^2 \frac{d^2 x}{rd\beta^2} + R \frac{dx}{rd\beta} - x = \delta_a^2 \frac{ctg\beta}{4b} \rho q + \alpha(1+\mu) \rho^2 \cdot \sin\beta \frac{d}{dz} \frac{dT(r,z,t)}{rd\beta},$$

$$R^2 \frac{d^2 x}{rd\beta^2} + R \frac{dx}{rd\beta} - x = \delta_a^2 \frac{ctg\beta}{4b} \rho q + \alpha(1+\mu) \rho^2 \cdot \sin\beta \frac{d}{dz} \frac{dT(r,z,t)}{rd\beta}, \quad (17)$$

де $\beta = \pi/2 + \varphi$; $Rctg\beta$ – потоковий радіус аноду, $rd\beta$ – елементарна дуга яка відрховується від вершини конуса, $x = \frac{d\omega}{rd\beta}$ – зміна кута нахилу дотичної до

елементарної дуги, $q = \frac{Q\delta^2}{4R}$ поперекова сила, $b = \frac{E\delta^2}{12(1-\mu^2)}$ – жорсткість.

Рівняння для знаходження моментів та зусиль напишемо у вигляді:

$$n_\varphi = n_\rho = -q \cdot tg\beta; n_v = -\frac{d(q\rho)}{rd\beta};$$

$$m_\varphi = m_\rho = -b \left[\frac{dx}{rd\beta} + \frac{\mu}{r} - \alpha(1+\mu) \frac{dT}{rd\beta} \sin\beta \right];$$

$$m_v = -b \left[\frac{x}{\rho} + \frac{dx}{rd\beta^2} \alpha(1+\mu) \frac{dT}{rd\beta} \sin\beta \right]. \quad (18)$$

За визначеними значеннями моментів та зусиль знайдемо напруження у конічній оболонці:

$$\sigma_{vv} = -\frac{\sin^2\beta}{R} \frac{dm_z}{rd\beta};$$

$$\sigma_{0R} = -\frac{dq}{rd\beta} \sin\beta; \quad (19)$$

$$\sigma_{vR} = -\frac{dq}{rd\beta} \sin\beta \cdot tg\beta;$$

За цими виразами визначимо температурні напруження в аноді під час дії плазми при генерації наноструктур.

Стійкість електродів (ресурс) при плазмовій генерації наноструктур будемо визначати за зміною геометрії електродів. У випадку досягнення ресурсу, пов'язаного з реалізацією критичної зміни геометрії електродів, будуть виконуватися наступні умови:

$$\Delta l_k = \Delta l_{k.cr} \quad \text{або} \quad \Delta l_a = \Delta l_{a.cr}. \quad (20)$$

Тоді час досягнення ресурсу для катоду можна виразити як:

$$t_{\rho k} = \frac{\Delta l_k P_k - \Delta l_{n.sp}}{V_{rk_{max}}} + t_{k.sp}, \quad (21)$$

де Δl_k – зміна геометрії катоду, $\Delta l_{n.sp}$ – початкова геометрія,

$V_{rk_{max}}$ – максимальна швидкість зміни геометрії катоду, $t_{k.sp}$ – час досягнення

стаціонарного режиму на катоді

для аноду:

$$t_{\rho k} = \frac{\Delta l_k P_k - \Delta l_{n.sp}}{V_{rk_{max}}} + t_{k.sp}, \quad (22)$$

де Δl_a – зміна геометрії аноду, $\Delta l_{n.sp}$ – початкова геометрія,

$V_{rk_{max}}$ – максимальна швидкість зміни геометрії аноду, $t_{a.sp}$ – час досягнення стаціонарного режиму на аноді.

За цими умовами і будемо розраховувати ресурс електродів.

2. Результати розрахунків

Сумісне вирішення задач теплопровідності та термопружності дозволило отримати поля температур (Рис. 2, 3) та напружень, а також визначити зміну геометрії катоду та аноду за час виходу установки на робочу температуру (Рис. 4, 5).

Розрахунки температурних полів на торцевій поверхні катоду з графіту (Рис. 2) показали, що при постійному рості температури поверхні катоду характер її розподілення принципово не змінюється.

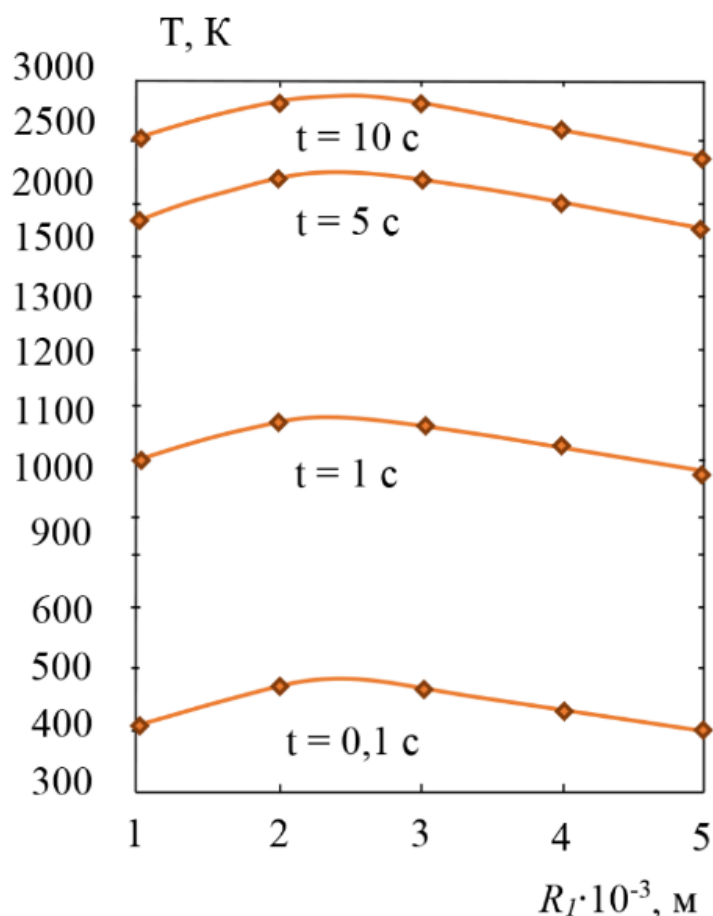


Рисунок 2 – Розподілення температур по поверхні катоду за час виходу на стаціонарний режим.

В той же час у температурних полях за твірною аноду, під час виходу на стаціонарний режим, спостерігаються деякі неоднорідності (рис. 3).

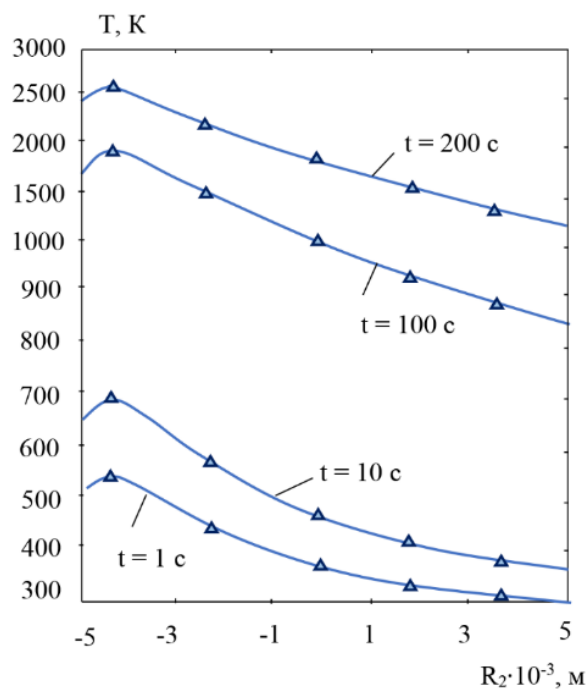


Рисунок 3 – Розподіл температур за твірною аноду під час виходу на робочу температуру.

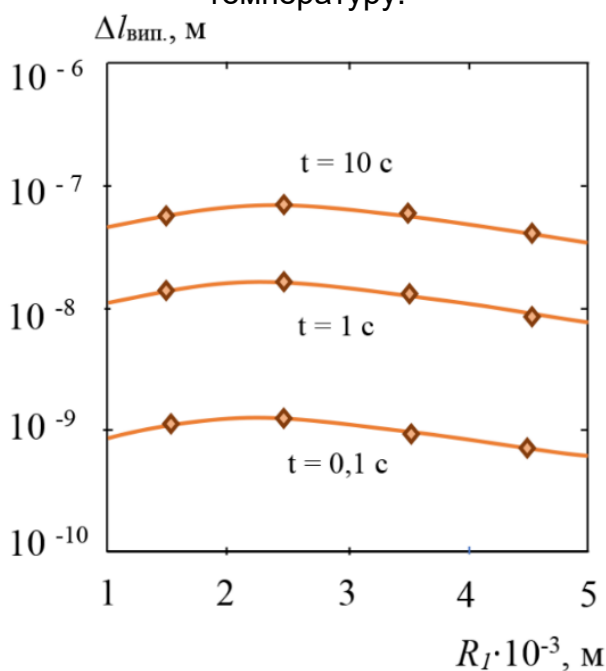


Рисунок 4 – Зміна геометрії графітового катоду під час виходу на робочу температуру.

Розрахунок зміни геометрії графітового катоду за радіусом у результаті випаровування Δl_{vip} (рис. 4) у різні моменти часу при виході на стаціонарний режим показав незначний вплив випаровування на зміну геометрії катоду. Визначення зміни геометрії аноду вздовж твірної, завдяки випаровуванню під час виходу на робочий режим (рис. 5), показало найбільший вплив випаровування на малій ділянці аноду найближче розташованої до катоду.

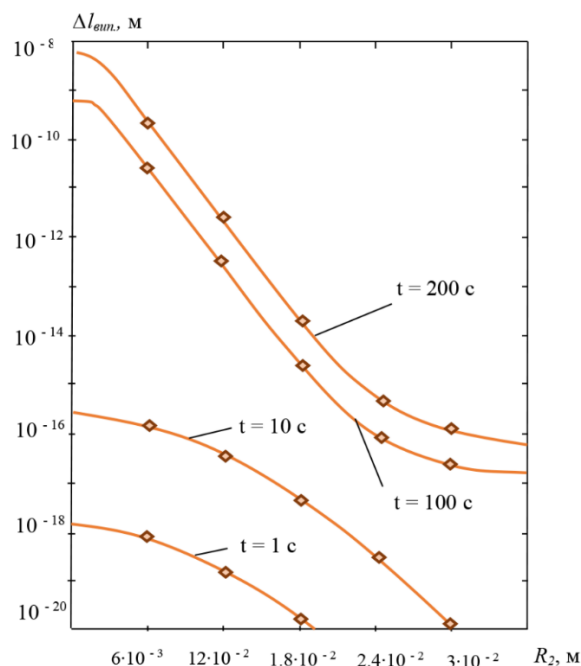


Рисунок 5 – Зміна геометрії аноду за твірною при виході на робочу температуру

Дослідження динаміки зміни температурних напружень на електродах під час формування наноструктур у плазмовому середовищі свідчать про те, що значення температурних напруг віддалені від межі міцності матеріалу (Рис. 6). Хоча можливе термовтомлене руйнування матеріалу за рахунок тривалого часу роботи.

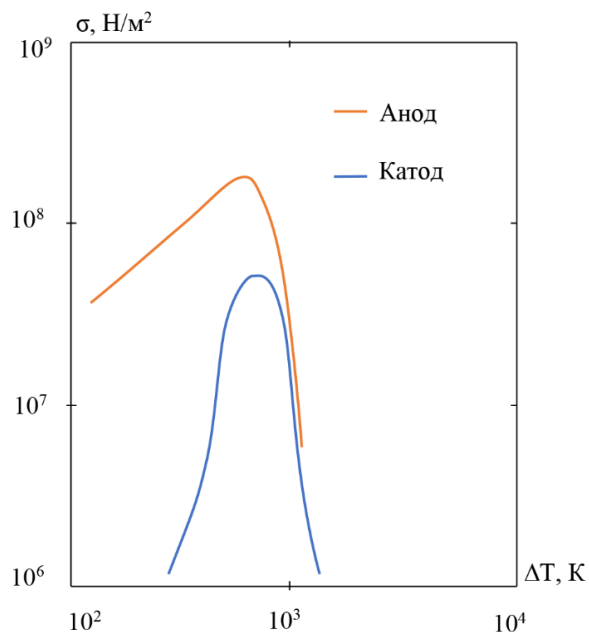


Рисунок 6 – Залежність діючих напружень від температури катоду та аноду.

Розрахунок ресурсу електродів під час створювання вуглецевих наноструктур у плазмовому середовищі за першими вимогами вище наведеного методу (13 – 16) склав $2.52 \cdot 10^5 \text{ с}$. Експериментальний ресурс графітового катоду

складає $2.88 \cdot 10^5$ с, що досить близько до розрахункового значення.

Порівняння характеру зміни геометрії електродів після $1.8 \cdot 10^5$ с праці наведено на Рис. 7 та 8.

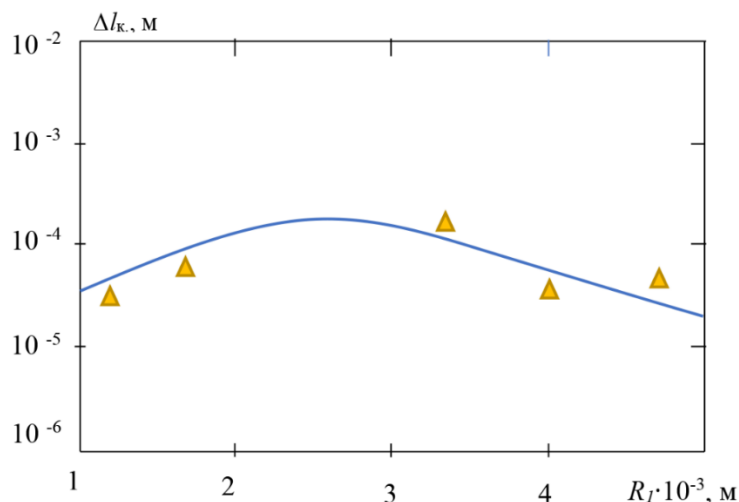


Рисунок 7 – Порівняння теоретичних досліджень та експериментальних вимірювань зміни геометрії графітового катоду за радіусом після $1.8 \cdot 10^5$ с праці.

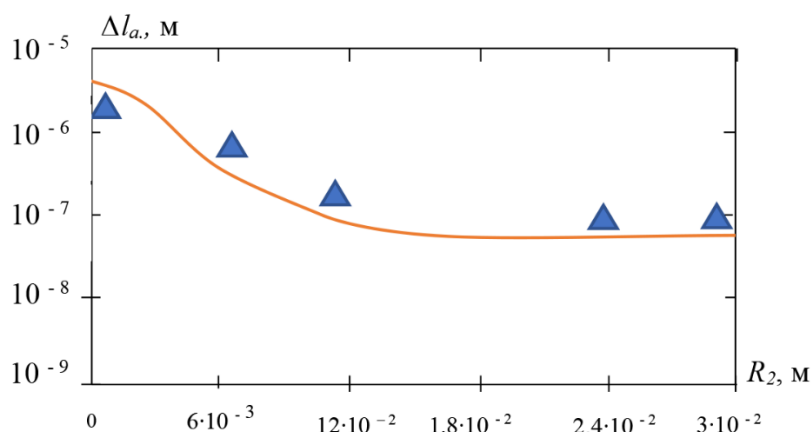


Рисунок 8 – Порівняння теоретичних та експериментальних досліджень зміни геометрії аноду за твірною після $1.8 \cdot 10^5$ с праці.

Таким чином розроблену теоретичну модель можна використовувати для розрахунку ресурсу електродів при отриманні наноструктур у плазмовому середовищі.

Висновки

Розроблена модель визначення зносу електродів при плазмовому формуванні наноструктур. Вона враховує дію електродних плям, випаровування, розпилення та температурні напруження у тілі електродів. Було отримано розподіл температур на поверхні катоду та аноду. Розглянуто зміну геометрії графітового катоду та аноду під час виходу на робочу температуру. Отримано залежність діючих напружень від температури катоду та аноду. Проведено теоретичне дослідження зміни геометрії графітового катоду та порівняно їх з

експериментальними вимірюваннями. Збіг отриманих значень теоретичних та експериментальних результатів свідчить про працездатність розробленої моделі.

Список літератури

1. Beilis, I. I. Thin Film Deposition by Plasma Beam of a Vacuum Arc with Refractory Anodes. / I. I. Beilis, R. L. Boxman // In: Pogrebnjak A., Novosad V. (eds) *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. – 2019. – P. 1–15.
https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3_1
2. Witke, T. Comparison of filtered high-current pulsed arc deposition (ϕ -HCA) with conventional vacuum arc methods. / T. Witke, T. Schuelke, B. Schultrich, P. Siemroth, J. Vetter // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – Vol. 1(126) / – P. 0257 – 8972. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00544-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00544-2)
3. Beilis, I. Cathode Spot Jets. Velocity and Ion Current. / I. Beilis // In: *Plasma and Spot Phenomena in Electrical Arcs*. Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics. – 2020. – Vol 113. – P. 347 – 420.
<http://dx.doi.org/10.1088/0963-0252/17/1/015016>
4. Kovachov, S. S. Chemical evaluation of the quality of nanostructures synthesized on the surface of indium phosphide. / S. S. Kovachov, I. T. Bogdanov, D. O. Pimenov, V. V. Bondarenko, A. A. Konovalenko, M. M. Skurska, I. S. Konovalenko, Y. O. Suchikova *Archives of Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1 (110). – P. 18 – 26. <http://dx.doi.org/10.5604/01.3001.0015.3592>
5. Suchikova, Y. O. Optimal ranges determination of morphological parameters of nanopatterned semiconductors quality for solar cells. / Y. O. Suchikova, I. T. Bogdanov, S. S. Kovachov, et al. // *Archives of Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 1 (101). – P. 15 – 24.
<http://dx.doi.org/10.5604/01.3001.0013.9502>
6. Zolotukhin, D. B. Optimization of discharge triggering in micro-cathode vacuum arc thruster for CubeSats. / D. B. Zolotukhin, M. Keidar // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2018. – Vol. 7 (27). – P. 1361-6595.
<http://dx.doi.org/10.1088/1361-6595/aacdb0>
7. Levchenko, I. Recent progress and perspectives of space electric propulsion systems based on smart nanomaterials. / I. Levchenko, S. Xu, Teel, G. et al // *Nat Commun*. – 2018. – Vol. 9. – P. 879.
<https://doi.org/10.1038/s41467-017-02269-7>
8. Medhisuwakul, N. Development and application of cathodic vacuum arc plasma for nanostructured and nanocomposite film deposition / N. Medhisuwakul, S. Pasaja, J. Sansongsiri, S. Kuhakan, L. D. Intarasiri // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 229. – P. 36-41.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.06.051>
9. Glukhov, O. V. Nanostructured Coatings Based on Amorphous Carbon and Gold Nanoparticles Obtained by the Pulsed Vacuum-arc Method / O. V. Glukhov, A. Ya. Kolpakov, M. G. Kovaleva, V. M. Beresnev, S. S. Manokhin, et al. // *Journal of nano- and electronic physics*. – 2019. – Vol. 11. – No. 4. – P. 04019.
10. Machalska G. Titanium dioxide nanoparticles and thin films deposited by an atomization method. / G. Machalska, M. Noworolnik, M. Szindler, V. Sitek, R. Babilas // *Archives of Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 1. – No. 2. – P. 34 – 41.
11. Timerkaev, B. A. Creation of Silicon Nanostructures in Electric Arc

Discharge. / B. A. Timerkaev, B. R. Shakirov, & D. B. Timerkaeva // High Energy Chem. – 2019. – Vol. 53. – P. 162 – 166.

12. Duriagina, Z. A. Microstructure and electrochemical properties of the vanadium alloys after low-temperature nitrogen plasma treatment. / Z. A. Duriagina, D. D. Ryzhak, V. V. Kuly, T. L. Tepla, I. A. Lemishka, L. I. Bohun // Archives of Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 1. – No. – 102. – P. 5 – 12. <http://dx.doi.org/10.5604/01.3001.0014.1451>

13. Beilis, I. State of the theory of vacuum arcsю / I. Beilis // in IEEE Transactions on Plasma Science. – 2001. – Vol. 29. – No. 5. – P. 657 – 670. <http://dx.doi.org/10.1109/27.964451>.

14. Baranov, O. O. Effect of ion current density on the properties of vacuum arc-deposited TiN coatings / O. O. Baranov, J. Fang, A. E. Rider, S. Kumar, K. Ostrikov // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – Vol. 41. – No. 1. – P. 3640 – 3644. <http://dx.doi.org/10.1109/TPS.2013.2286405>

15. Zhou, Z. Direct observation of vacuum arc evolution with nanosecond resolution / Z. Zhou, A. Kyritsakis, Z. Wang, et al.// Sci Rep. – 2019. – No. 9. – P. 7814. DOI: [10.1038/s41598-019-44191-6](https://doi.org/10.1038/s41598-019-44191-6)

16. Mesyats, G. A. Ecton Mechanism of the Cathode Spot Phenomena in a Vacuum Arc / G. A. Mesyats // in IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – Vol.41. – No.4. – P. 676 – 694. <http://dx.doi.org/10.1109/TPS.2013.2247064>.

17. Xiao, Z. Modeling of cathode spot crater formation and development in vacuum arc / Zhang, Xiao, Wang, Lijun, Jia, Shenli and D. L. Shmelev, // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2017. – Vol. 50. – No. 45. – P. 1361 – 1411. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6463/aa8db3>

18. Zhang, X. Shenli Improved model for cathode spot crater in vacuum arc / Zhang, Xiao, Wang, Lijun, Ma, Jinwei, Wang, Yuan, Jia, Shenli // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2018. – Vol. 52. – No. 3. – P. 035204. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6463/aaeac0>.

19. Shmelev, D. L. Numerical Simulation of Plasma Near the Cathode Spot of Vacuum Arc. / D. L. Shmelev, S. A. Barengolts and M. M. Tsventoukh // in IEEE Transactions on Plasma Science. – 2017. – Vol. 45. – No. 11. – P. 3046 – 3053.

20. Anders, A. The evolution of ion charge states in cathodic vacuum arc plasmas: a review. / A. Anders // Plasma Sources Science and Technology. – 2012. – Vol. 21. – No. 3. – P. 035014. <http://dx.doi.org/10.1088/0963-0252/21/3/035014>

21. Beilis I. Cathode Spot Jets. Velocity and Ion Current. / I. Beilis // In: Plasma and Spot Phenomena in Electrical Arcs. Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, Springer, Cham. – 2020. Vol. 113. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44747-2_12

22. Baranov, O. Current Distribution on the Substrate in a Vacuum Arc Deposition Setup. / O. Baranov, M. Romanov // Plasma Processes and Polymers. – 2008. – Vol. 5. – P. 256. <https://doi.org/10.1002/ppap.200700160>

23. Levchenko, M. Ion current distribution on a substrate during nanostructure formation / M. Levchenko, M. Korobov, M. Romanov, M. Keidar // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2004. – Vol. 37. – No.12. P. 1690-1695. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/37/12/01>

24. Baranov, O., Romanov, M., Wolter, M., Kumar, S., Zhong, X., Ostrikov, K.: Low-pressure planar magnetron discharge for surface deposition and nanofabrication. Physics of Plasmas 17, (2010), 053509/

25. M. Keidar, A. Shashurin. J. Li, O. Volotskova, Kundrapu Arc plasma

synthesis of carbon nanostructures: where is the frontier? Madhusudhan, Zhuang, Tai Sen. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44/17, (2011).

26. Dogyun Hwangbo, Shin Kajita, Sergey A. Barengolts, Mikhail M. Tsventoukh, Noriyasu Ohno, Transition in velocity and grouping of arc spot on different nanostructured tungsten electrodes, *Results in Physics*, Volume 4, (2014), P. 33 – 39.

27. Shin Kajita, Noriyasu Ohno, Shuichi Takamura, Yoshiyuki Tsuji, Direct observation of cathode spot grouping using nanostructured electrode, *Physics Letters A*, 373/46, (2009), P. 4273 – 4277.

28. S.A. Barengolts, V. G. Mesyats, M. M. Tsventoukh, S. Kajita, D. Hwangbo and N. Ohno, "Effect of the Nanostructured Layer Thickness on the Dynamics of Cathode Spots on Tungsten," in *IEEE Transactions on Plasma Science*, 46/11, (2018), P. 4044 – 4050.

29. Vacuum arc velocity and erosion rate measurements on nanostructured plasma and HVOF spray coatings. Rao, Lakshminarayana, Munz, Richard J Meunier, Jean-Luc, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 14/40, (2007), P. 4192 – 4201.

30. Kostyuk G. Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows / G. Kostyuk, O. Melkozirova, E. Kostyuk, Iur. Shirokiy. *Development and tools in technological systems, KhNTU "KhPI"*, 92, (2020), 107 – 121.

31. Моделювання дугового розряду на мідному катоді для генерації наноструктур / Ю.В. Широкий, Г. І. Костюк // *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології, збірник наукових праць – Харків : Нац. аерокосм. ун-т "ХАІ"*, 2021. – Вип. 91 С.62-77. <https://doi.org/10.32620/oikit.2021.91.05>

32. Efficiency and Performance of Milling Using Cutting Tools with Plates of a New Class / Kostyuk G., Popov V., Shyrokyi Yu, Yevsieienkova H. // *Advanced Manufacturing Processes II – Selected Paper from the 2nd Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes* (2020), 99

33. Моделювання умов отримання наноструктур в алюмінієвих сплавах при дії іонізуючого випромінювання / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, Т. В. Постельник // *Авіаційно-космічна техніка та технологія: сб. науч. тр. Нац. аерокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*. - Вип. 2. - Х. - 2022. - С. 55 – 63 <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.2.07>

34. Теоретичне дослідження температурних полів міді при формуванні наноструктурних шарів у плазмовому середовищі / Ю. В. Широкий, А. Ю. Сисоєв, Ю. С. Панченко // *Авіаційно-космічна техніка та технологія: сб. науч. тр. Нац. аерокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вип. 5. – Х. – 2022. – С. 51 – 60 DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.5.04>

35. Моделювання електроерозійних процесів на графітових електродах при формуванні наноструктур у плазмовому середовищі / Ю. В. Широкий // *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології, збірник наукових праць – Харків : Нац. аерокосм. ун-т "ХАІ"*, 2021. – Вип. 94 С. 58 – 76. <https://doi.org/10.32620/oikit.2021.94.06>

References

1. Beilis, I. I., Boxman, R. L. Thin Film Deposition by Plasma Beam of a Vacuum Arc with Refractory Anodes. In: *Pogrebnjak A., Novosad V. (eds) Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore*, 2019, pp. 1 – 15.

2. Witke, T., Schuelke, T., Schultrich, B., Siemroth, P., Vetter J. Comparison of filtered high-current pulsed arc deposition (ϕ -HCA) with conventional vacuum arc methods *Surface and Coatings Technology*, 2000, vol.1, no 126. pp. 0257-8972.
3. Beilis, I. Cathode Spot Jets. Velocity and Ion Current. *In: Plasma and Spot Phenomena in Electrical Arcs. Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics*, 2020, vol 113, pp. 347 – 420.
4. Kovachov, S. S., Bogdanov, I. T., Pimenov, D. O., Bondarenko, V. V., Konovalenko, A. A., Skurska, M. M., Konovalenko, I. S., Suchikova, Y. O. Chemical evaluation of the quality of nanostructures synthesized on the surface of indium phosphide. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1, no. 110, pp. 18 – 26.
5. Suchikova, Y. O., Bogdanov, I. T., Kovachov, S. S., et al. Optimal ranges determination of morphological parameters of nanopatterned semiconductors quality for solar cells. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 1, no. 101, pp. 15 – 24.
6. Zolotukhin, D. B., Keidar, M. Optimization of discharge triggering in micro-cathode vacuum arc thruster for CubeSats. *Plasma Sources Science and Technology*, 2018, vol. 7, no. 27, pp. 1361 – 6595.
7. Levchenko, I., Xu, S., Teel, G., et al. Recent progress and perspectives of space electric propulsion systems based on smart nanomaterials. *Nat Commun*, 2018, vol. 9, pp. 879.
8. Medhisuwakul, N., Pasaja, S., Sansongsiri, J., Kuhakan, S., Intarasiri, L. D. Development and application of cathodic vacuum arc plasma for nanostructured and nanocomposite film deposition. *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 229, pp. 36 – 41.
9. Glukhov, O. V., Kolpakov, A. Ya., Kovaleva, M. G., Beresnev, V. M., Manokhin, S. S., et al. Nanostructured Coatings Based on Amorphous Carbon and Gold Nanoparticles Obtained by the Pulsed Vacuum-arc Method. *Journal of nano- and electronic physics*, 2019, vol. 11, no. 4, pp. 04019.
10. Machalska G., Noworolnik, M., Szindler, M., Sitek, V., Babilas, R. Titanium dioxide nanoparticles and thin films deposited by an atomization method. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 1, no. 2, pp. 34 – 41.
11. Timerkaev, B. A., Shakirov, B. R., Timerkaeva, D. B. Creation of Silicon Nanostructures in Electric Arc Discharge. *High Energy Chem*, 2019, vol. 53, pp. 162-166.
12. Duriagina, Z. A., Ryzhak, D. D., Kuly, V. V., Tepla, T. L., Lemishka, I. A., Bohun, L. I. Microstructure and electrochemical properties of the vanadium alloys after low-temperature nitrogen plasma treatment. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 1, no. 102, pp. 5 – 12.
13. Beilis, I. State of the theory of vacuum arcs *in IEEE Transactions on Plasma Science*, 2001, vol. 29, no. 5, pp. 657 – 670.
14. Baranov, O. O., Fang, J., Rider, A. E., Kumar, S., Ostrikov, K. Effect of ion current density on the properties of vacuum arc-deposited TiN coatings. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, vol. 41, no. 1, pp. 3640 – 3644.
15. Zhou, Z., Kyritsakis, A., Wang, Z., et al. Direct observation of vacuum arc evolution with nanosecond resolution. *Sci Rep*, 2019, no. 9, pp. 7814.
16. Mesyats, G. A. Ecton Mechanism of the Cathode Spot Phenomena in a Vacuum Arc *in IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, vol. 41, no. 4, pp. 676 – 694.

17. Xiao, Z., Lijun, W., Shenli J., Shmelev, D. L. Modeling of cathode spot crater formation and development in vacuum arc. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, vol. 50, no. 45, pp. 1361 – 1411.
18. Zhang, X, Lijun, W., Jinwei, Ma., Yuan, W., Shenli, J. Improved model for cathode spot crater in vacuum arc. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, vol. 52, no. 3, pp. 035204.
19. Shmelev, D. L., Barengolts S. A., Tsventoukh, M. M. Numerical Simulation of Plasma Near the Cathode Spot of Vacuum Arc in *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, vol. 45, no. 11, pp. 3046 – 3053.
20. Anders, A. The evolution of ion charge states in cathodic vacuum arc plasmas: a review. *Plasma Sources Science and Technology*, 2012, vol. 21, no. 3, pp. 035014.
21. Beilis I. Cathode Spot Jets. Velocity and Ion Current. In: *Plasma and Spot Phenomena in Electrical Arcs. Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, Springer, Cham*, 2020, vol. 113.
22. Baranov, O., Romanov, M. Current Distribution on the Substrate in a Vacuum Arc Deposition Setup. *Plasma Processes and Polymers*, 2008, vol. 5, pp. 256.
23. Levchenko, M., Korobov, M., Romanov, M., Keidar, M. Ion current distribution on a substrate during nanostructure formation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, vol. 37, no.12, pp. 1690 – 1695.
24. Baranov, O., Romanov, M., Wolter, M., Kumar, S., Zhong, X., Ostrikov, K. Low-pressure planar magnetron discharge for surface deposition and nanofabrication. *Physics of Plasmas*, 2010, vol. 17, pp. 053509.
25. Keidar, M., Shashurin, A., Li, J., Volotskova, O., Kundrapu Arc plasma synthesis of carbon nanostructures: where is the frontier? Madhusudhan, Zhuang, Tai Sen. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011. Vol. 44/17.
26. Hwangbo, D., Kajita, S., Barengolts, S. A., Mikhail, M., Tsventoukh, N. O. Transition in velocity and grouping of arc spot on different nanostructured tungsten electrodes. *Results in Physics*, 2014, vol. 4, pp. 33 – 39.
27. Shin Kajita, Noriyasu Ohno, Shuichi Takamura, Yoshiyuki Tsuji. Direct observation of cathode spot grouping using nanostructured electrode. *Physics Letters A*, 2009, vol. 373, no. 46, pp. 4273 – 4277.
28. Barengolts, S. A., Mesyats, V. G., Tsventoukh, M. M., Kajita, S., Hwangbo, D., Ohno, N. Effect of the Nanostructured Layer Thickness on the Dynamics of Cathode Spots on Tungsten in *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, vol. 46, no.11, pp. 4044 – 4050.
29. Rao, Lakshminarayana, Munz, Richard J Meunier, Jean-Luc. Vacuum arc velocity and erosion rate measurements on nanostructured plasma and HVOF spray coatings. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, vol. 14, no. 40, pp. 4192 – 4201.
30. Kostyuk, G., Melkozirova, O., Kostyuk, E., Shirokiy, Iur. Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows. *Development and tools in technological systems, KhNTU "KhPI"*, 2020, vol. 92, pp. 107 – 121.
31. Shyroky, Yu. V., Kostyuk, H. I. Modelyuvannya duhovoho rozryadu na midnomu katodi dlya heneratsiyi nanostruktur. *Vidkryti informatsiyi ta komp'yuterni intehrovani tekhnolohiyi, zbirnyk naukovykh prats – Kharkiv : Nats. aerokosm. un-t "KhAI"*, 2021, vol. 91, pp. 62-77.
32. Kostyuk, G., Popov, V., Shyroky, Yu, Yevsieienkova, H. Efficiency and

Performance of Milling Using Cutting Tools with Plates of a New Class. *Advanced Manufacturing Processes II – Selected Paper from the 2nd Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes*, 2020, vol. 99.

33. Shyroky, Yu. V., Sysoyev, Yu. O., Postel'nyk, T. V. Modelyuvannya umov otrymannya nanostruktur v alyuminiyevykh splavakh pry diyi ionizuyuchoho vyprominyuvannya. *Aviatsiyno-kosmichno tekhnika ta tekhnolohiya: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta ym. N. E. Zhukovskoho «KhAY»*, 2022, vol. 2, pp. 55 – 63.

34. Shyroky, Yu. V., Sysoyev, A. Yu., Panchenko, Yu. S. Teoretychne doslidzhennya temperaturnykh poliv midi pry formuvanni nanostrukturnykh shariv u plazmovomu seredovyschi. *Aviatsiyno-kosmichno tekhnika ta tekhnolohiya: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta ym. N. E. Zhukovskoho «KhAY»*, 2022, vol. 5, pp. 51 – 60.

35. Shyroky, Yu. V. Modelyuvannya elektroeroziynykh protsesiv na hrafitovykh elektrodakh pry formuvanni nanostruktur u plazmovomu seredovyschi. *Vidkryti informatsiyi ta komp'yuterni intehrovani tekhnolohiyi, zbirnyk naukovykh prats' – Kharkiv : Nats. aerokosm. un-t "KhAI"*, 2021, vol. 94, pp. 58 – 76.

Надійшла до редакції 22.08.2024, розглянута на редколегії 23.08.2024.

Theoretical study of thermal processes on carbon electrodes as a result of plasma action during nanostructure generation in a vacuum arc

A mathematical model has been refined to determine the thermophysical and thermomechanical processes on electrodes during the plasma formation of nanostructures. The model takes into account the effects of electrode spots, evaporation, sputtering, and thermal stresses in the electrode bodies. Calculations of temperature distribution on the surfaces of the graphite cathode and anode were carried out, considering the conditions necessary for obtaining nanostructures. An analysis of the thermophysical processes on the surfaces of the graphite cathode and anode during the transition to the working regime was conducted. The stability of the electrodes during plasma generation of nanostructures was determined by changes in the geometry of the electrodes. Calculations of the temperature fields on the end surface of the graphite cathode showed that with a continuous increase in the cathode surface temperature, the nature of its distribution does not change fundamentally. Calculation of temperature fields along the radius of the graphite cathode at different moments in time during the transition to the working regime showed a slight impact of evaporation on the change in the cathode's geometry. Determining the temperature fields along the generatrix of the anode showed the greatest impact of evaporation on the small area of the anode closest to the cathode. The dependencies of the acting stresses on temperature for the graphite cathode and anode were obtained. Studies of the dynamics of changes in thermal stresses on the electrodes during the formation of nanostructures in a plasma environment indicate that the values of thermal stresses are far from the material's strength limit. A theoretical study of the thermophysical and thermomechanical processes on the graphite cathode was carried out and compared with experimental measurements. The calculation of the electrodes' lifespan during the creation of carbon nanostructures in a plasma environment was $2.52 \cdot 10^5$ s. The experimental lifespan of the graphite cathode is $2.88 \cdot 10^5$ s, which is quite close to the

calculated value. The coincidence of the obtained theoretical and experimental results indicates the viability of the developed model. The article may be of interest when designing equipment for obtaining nanostructures in a plasma environment and for further research on the physical parameters of electrodes.

Keywords: temperature, heat flux, thermal stresses, electrodes, electrode spots, nanostructures.

Відомості про авторів:

Широкий Юрій Вячеславович – кандидат технічних наук, доцент, кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» м. Харків, Україна; i.shyrokyi@khai.edu; ORCID: 0000-0002-4713-0334

Сисоєв Юрій Олександрович – д-р техн. наук, старш. наук. співроб, проф. каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Торосян Олена Василівна – старший викладач кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Жидєєв Павло Романович – аспірант кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

About the Author:

Shyrokyi Yurii – Doctor of Philosophy, Assistant-Professor, Head of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine; i.shyrokyi@khai.edu; ORCID: 0000-0002-4713-0334

Sysoiev Iurii – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: i.sysoiev@khai.edu, ORCID: 0000-0001-5006-8546, Scopus Author ID: 55886163000.

Torosian Olena – Senior Lecturer of Dept. of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.tarasyan@khai.edu, ORCID: 0000-0002-7389-6093.

Zhydieiev Pavlo – PhD student, Department of Theoretical Mechanics, Mechanical Engineering, and Robotic Systems National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, ORCID:0009-0007-4232-6817.