

УДК 541.18.046.8

Г.І. КОСТЮК, О.М. МЕЛКОЗЬОРОВА

*Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Україна***ІНЖЕНЕРНА МОДЕЛЬ ДІЇ ІОНІВ РІЗНИХ СОРТІВ, ЗАРЯДНОСТЕЙ, ЕНЕРГІЙ І КРАПЕЛЬ, СКОНДЕНСОВАНИХ НА ПОВЕРХНІ**

При взаємодії матеріалу з іонними пучками або плазовими потоками на поверхні твердого тіла і в його поверхневому шарі протікає ряд процесів, які визначають якість отриманих покриттів, їх склад, швидкість їх нанесення. Запропоновано інженерну модель дії потоку заряджених частинок різних сортів, зарядностей і енергій, а також крапель матеріалу, сконденсованого на підкладку. Були отримані поля температур і температурних напруг, швидкості наростання температур, які доводять можливість отримання наноструктурних матеріалів, як на глибині матеріалу, так і на його поверхні у вигляді покриття нанометрової товщини, яке має дуже високу адгезію до основного матеріалу.

Ключові слова: наноструктура, температурні поля, температурні напруги, швидкості зростання температур.

Вступ

При взаємодії плазми з підкладкою частина іонів осаджується на підкладку, утворюючи захисне покриття, частина проникає всередину кристалічної решітки, при цьому утворюються наноструктури, як на поверхні матеріалу у вигляді покриття нанометрової товщини, так і на глибині, яка дорівнює відстаням, на які проникає іони різних енергій, сортів та зарядностей. Таким чином, на поверхні підкладки формується покриття, яке має хорошу адгезію до підкладки за рахунок того, що в нижніх шарах є атоми, однорідні за хімічним складом і властивостями.

При взаємодії поверхонь з іонними пучками або плазовими потоками на поверхні твердого тіла і в його поверхневому шарі протікає ряд процесів, які визначають якість одержуваних покриттів, їх склад, швидкість їх нанесення і певну якість виробу. Процеси, що проходять поблизу поверхні, впливають в основному на швидкість нанесення покриття і склад плівки. Ті процеси, які протікають у приповерхневому шарі, зумовлюють утворення формованої структури та якісних показників покриття [1].

Імовірність кожного з процесів складним чином залежить від властивостей самих іонів (маса, величина заряду), швидкості його руху та кута зіткнення з поверхнею, а також від складу, температури, фізико-енергетичних властивостей. Все це розширює спектр можливих плазових технологій.

Тому так важливо проаналізувати обстановку при дії різних іонів на підкладку і при конденсації на неї покриття.

Робота виконувалася в рамках програми Мініс-

терства освіти і науки України «Нові та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі» (підсекція 13 «Аерокосмічна техніка та транспорт») та за темами: «Створення фізико-технічних основ підвищення якості матеріалів аерокосмічних конструкцій» та «Розробка технологічних основ інтегрування технологій плазово-іонної обробки деталей аерокосмічної техніки», госпдоговірних робіт про співробітництво.

Дослідження дії бомбардування іонів різних сортів, енергій та зарядності на поверхню деталі

Дія заряджених частинок на конструкційні матеріали призводить до появи на глибині досить високих температур, при дії індивідуальних іонів різних сортів і енергій, в зоні теплового впливу є ймовірність появи температурних напруг значної величини, що підтверджує можливість зародження локальних зон де досягаються умови появи наноструктур [2].

Нами було розглянуто дію таких іонів як азот та титан. Ми запровадили позначення:

частка А – азот, енергія частки $E=250$ эВ, зарядове число дорівнює трьом;

частка В – азот, енергія частки $E = 1000$ эВ, зарядове число дорівнює трьом;

частка С – титан, енергія частки $E = 1000$ эВ, зарядове число дорівнює трьом.

У табл. 1 наведено значення температур, температурних напруг і радіусів їх розподілу, які були отримані в результаті впливу перерахованих вище частинок, за методикою, запропонованою в [3].

Дія заряджених частинок на конструкційні матеріали призводить до появи на глибині досить високих температур, при дії індивідуальних іонів різних сортів і енергій, в зоні теплового впливу є ймовірність появи температурних напруг значної величини, що підтверджує можливість зародження локальних зон де досягаються умови появи наноструктур [2].

Нами було розглянуто дію таких іонів як азот та титан. Ми запровадили позначення: частка А – азот, енергія частки $E=250$ эВ, зарядове число дорівнює трьом; частка В – азот, енергія частки $E = 1000$ эВ, зарядове число дорівнює трьом; частка С – титан, енергія частки $E = 1000$ эВ, зарядове число дорівнює трьом.

У табл. 1 наведено значення температур, температурних напруг і радіусів їх розподілу, які були отримані в результаті впливу перерахованих вище частинок, за методикою, запропонованою в [3].

Таблиця 1
Значення максимальних температур та температурних напруг

Радіуси	Температури	Напруга
$x=0$ (поверхня підкладки)		
$R_A = 2,27$ нм	$T_A = 275,18$ К	$\sigma_A = 9,96 \cdot 10^{10}$ Па
$R_B = 6,93$ нм	$T_B = 284,78$ К	$\sigma_B = 2,04 \cdot 10^{10}$ Па
$R_C = 1,7$ нм	$T_C = 417$ К	$\sigma_C = 2,34 \cdot 10^{10}$ Па
$x = 0,5L_C = 8,52$ нм; (Ti, $E=1000$ эВ, $z=3$)		
$R_A = 6,24$ нм	$T_A = 4,34 \cdot 10^4$ К	$\sigma_A = 4,69 \cdot 10^9$ Па
$R_B = 6,93$ нм	$T_B = 5,34 \cdot 10^4$ К	$\sigma_B = 2,33 \cdot 10^{10}$ Па
$R_C = 6,82$ нм	$T_C = 1,57 \cdot 10^6$ К	$\sigma_C = 9,99 \cdot 10^{10}$ Па
$x = 0,5L_A = 11,4$ нм; (N, $E=250$ эВ, $z=3$)		
$R_A = 9,08$ нм	$T_A = 6,92 \cdot 10^4$ К	$\sigma_A = 4,69 \cdot 10^9$ Па
$R_B = 6,93$ нм	$T_B = 1,05 \cdot 10^5$ К	$\sigma_B = 2,4 \cdot 10^{10}$ Па
$R_C = 3,92$ нм	$T_C = 8,49 \cdot 10^5$ К	$\sigma_C = 9,96 \cdot 10^{10}$ Па
$x = 0,5L_B = 34,6$ нм; (N, $E=1000$ эВ, $z=3$)		
-	-	-
$R_B = 2,27$ нм	$T_B = 3,25 \cdot 10^5$ К	$\sigma_B = 2,46 \cdot 10^{10}$ Па
-	-	-
$x = 0,8L_B = 55,4$ нм (N, $E=1000$ эВ, $z=3$)		
-	-	-
$R_B = 6,923$ нм	$T_B = 1,44 \cdot 10^5$ К	$\sigma_B = 2,29 \cdot 10^{10}$ Па
-	-	-

Дослідження дії різних розмірів крапель титану, сконденсованих на поверхню підкладки заліза

У початковий момент за час dt прогріється шар dx тому вирішуємо одновимірне завдання. Рівняння теплопровідності для одновимірної задачі, яке дозволяє визначити температуру в поверхневому шарі dx , має вигляд [4]:

$$\frac{2\pi}{3} r_0^3 c_{v1} \rho_1 T_{пл} = \frac{2\pi}{3} r_0^3 c_{v1} \rho_1 T_1 + \pi dx c_{v2} (T_1 - T_0), \quad (1)$$

де r_0 - радіус краплі;

c_{v1} - питома теплоємність сконденсованого матеріалу;

c_{v2} - питома теплоємність підкладки;

ρ_1 - щільність сконденсованого матеріалу;

ρ_2 - щільність матеріалу підкладки;

$T_{пл}$ - температура плавлення сконденсованого матеріалу;

T_1 - температура, що встановилася в шарі dx і краплі;

T_0 - температура підкладки.

Мінімальний шар dx можна прийняти за розмір кристалічної решітки підкладки ζ , тоді встановлена температура в шарі, що дорівнює розміру кристалічної решітки:

$$T_1 = \frac{c_{v1} \rho_1 T_{пл} + \frac{3R}{2r_0} c_{v2} \rho_2 T_0}{c_{v1} \rho_1 + c_{v2} \rho_2}. \quad (2)$$

Час, протягом якого фронт тепла пройшов відстань, що дорівнює розміру кристалічної решітки:

$$\Delta t = \frac{\zeta^2 \rho_2 c_{v2} (T_1 - T_0)}{\chi (T_{пл} - T)}, \quad (3)$$

де χ - коефіцієнт температуропровідності середовища

$$\chi = \frac{k}{\rho c_v}, \quad (4)$$

де k – позитивна постійна, що залежить від матеріалу та його фізичного стану.

ρ - щільність матеріалу,

c_v - питома теплоємність.

Послідовно збільшуючи відстань проникнення теплового фронту, з рівняння (3) можна визначити температуру на кожному кроці, а в початковий момент часу додатково врахувати швидкість поширення тепла:

$$V_{пл} = \frac{\zeta}{\Delta t}. \quad (5)$$

Одновимірне завдання має місце тільки в початковий момент зіткнення краплі з основою. Згодом одновимірне завдання переходить у тривимірне.

При розв'язанні тривимірного завдання температура, до якої нагрілася основа на глибину r_0 і до якої остигла рідка крапля:

$$T_1 = \frac{c_{v1} \rho_1 T_{пл} + c_{v2} \rho_2 T_0}{c_{v1} \rho_1 + c_{v2} \rho_2}. \quad (6)$$

Кордон розділу між температурою T_1 та температурою основи T_0 має розмір, що дорівнює відстані розміру кристалічної решітки ζ . Тому градієнт температури на сфері радіусу r_0 буде:

$$\frac{\partial T}{\partial r_0} = \frac{T_1 - T_0}{\zeta}. \quad (7)$$

Значення постійної інтегрування буде:

$$C_1 = r_0^2 \left[\frac{c_{v1}\rho_1 T_{пл} + c_{v2}\rho_2 T_0}{c_{v1}\rho_1 + c_{v2}\rho_2} - T_0 \right]. \quad (8)$$

Швидкість поширення фронту розігріву можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial r}{\partial t} = \frac{\chi C_1}{C_{v2}\rho_2 r_{cp}^2 (T_1 - T_0)}, \quad (9)$$

де $r_{cp} = r + dr$,

r — змінний радіус проникнення тепла в глиб основи.

Отже, знаючи швидкість поширення тепла, можна послідовно, починаючи з початкового значення $r = r_0$ визначити швидкість руху фронту поширення тепла і отримати функціональну залежність зміни температури в кожен момент часу від радіуса r .

Розрахунок був проведений для підкладки заліза, на яку сконденсували краплі титану.

Відповідно до [5] обсяг краплі, розплющеної при ударі об поверхню зразка і має діаметр D_k , дорівнює обсягу сфери діаметром $d_k = 1/2 D_k$. Були розглянуті краплі з радіусами 0,1; 0,2 та 0,3 мкм, розпорошені на ділянку (квадрат, з довжиною сторони 50 мкм)

$$\frac{\Delta n}{\Delta S} t = 112,66r^2 - 1198,2r + 2381,655. \quad (10)$$

Тоді отримуємо, що на площу $0,025 \text{ м}^2$ можна розмістити дві краплі з радіусом 0,1 мкм, дві краплі з радіусом 0,2 мкм і одну краплю з радіусом 0,3 мкм.

На підставі виразів (6) - (9) були отримані розподілу швидкості наростання температури по глибині підкладки і по радіусах розподілу температур, що виникли в результаті впливу сконденсованих різних розмірів крапель титану (рис. 1, 2).

На рис. 3 наведено розподіл температури по глибині залізної підкладки, отриманий при конденсації крапель титану різних розмірів. Величина температури на глибині, дуже близької до поверхні, приблизно однакова для крапель всіх розмірів і становить 802K, потім спостерігається збільшення температури до глибини, що дорівнює радіусу краплі, на 170 K, і різкий спад до температури навколиш-

нього середовища. Температура, отримана в результаті впливу крапель на підкладку, практично не залежить від розміру краплі, так як умови конденсації однакові і матеріал один і той же.

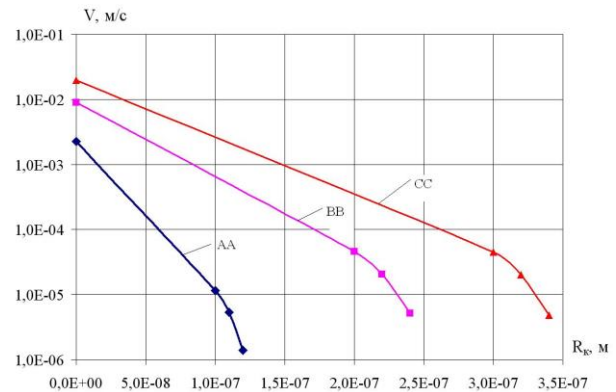


Рис. 1. Швидкість поширення фронту тепла отриманого в результаті осадження крапель AA, BP та CC на підкладку за радіусами розподілу температури

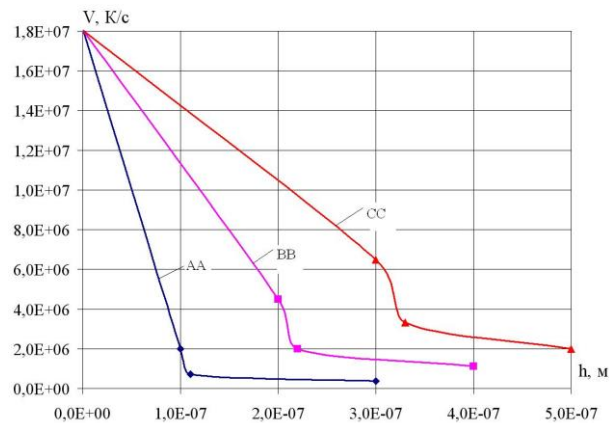


Рис. 2. Розподіл швидкості наростання температури по глибині підкладки, отриманий в результаті впливу сконденсованих різних розмірів крапель AA, BP і CC

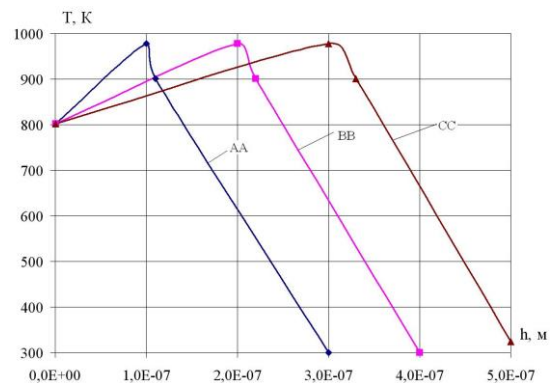


Рис. 3. Розподіл температури, отриманий в результаті впливу сконденсованих крапель AA, BP і CC по глибині підкладки

Якщо розглядати вплив крапель титану в площинах, паралельних поверхні підкладки та розташованих на глибині половини вільного пробігу іонів, різних сортів, зарядностей та енергій, то отримуємо розподіл за радіусами впливу температур (рис. 4). Ці площини розташовані на глибині, меншій, ніж радіуси крапель, тобто від площини до площини крапельна температура зростатиме.

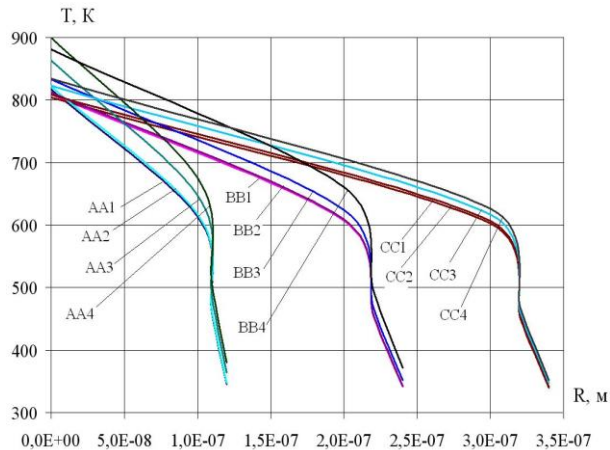


Рис. 4. Розподіл температури, отриманої в результаті впливу крапель AAi, BBi і CCi ($i = 1,4$), за радіусами дії температур підкладки заліза в різних площинах ($i = 1$ – площина, розташована на глибині $x = 0,5L_C$; $i = 2$ – площина, розташована на глибині $x = 0,5 L_A$; $i = 3$ – площина, розташована на глибині $x = 0,5 L_B$; $i = 4$ – площина, розташована на глибині $x = 0,8L_A$)

Потім розглядаємо площини, розташовані паралельно поверхні на глибині радіусів крапель. На першій площині є розподіл температур крапель всіх розмірів (температура від впливу краплі з радіусом 0,1 мкм буде максимальною), на другій – немає температури від впливу краплі з радіусом 0,1 мкм, на третю плоскість впливає лише крапля з радіусом 0,3 мкм.

Введемо позначення:

AA – краплі з радіусом 0,1 мкм,

BB – краплі з радіусом 0,2 мкм,

CC – краплі з радіусом 0,3 мкм.

На рис. 5 наведено тривимірне розташування описаних вище площин і розподілу на них температури в результаті впливу сконденсованих на підкладку крапель титану і бомбардування поверхні іонами різних сортів і зарядностей.

Для повного опису стану поверхневого шару, в якому утворюється наноструктура, необхідно скласти картину температурних напруг, що виникають у зв'язку з дією іонів різних сортів, зарядностей і енергій, а також крапель, сконденсованих на підкладку, які також мають свою температуру і відповідні тем-

пературна напруга. Температурні напруги для відповідних площин і температур визначаємо за формулою:

$$\sigma = \Delta T E \alpha, \quad (11)$$

де ΔT – падіння (зростання) температури на кожному кроці розрахунку;

E – модель пружності підкладки, ГПа;

α – коефіцієнт лінійного розширення.

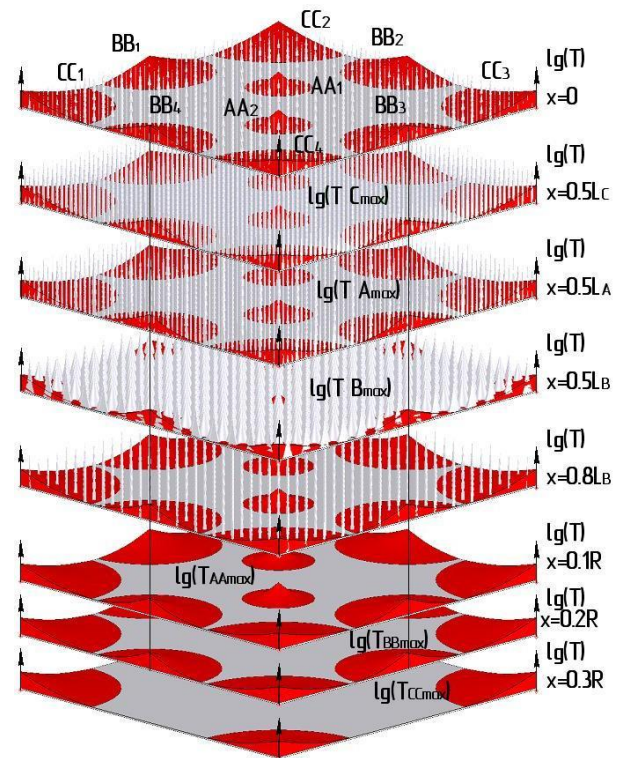


Рис. 5. Тривимірний графік, що показує розподіл температурних напруг, розподілених по глибині підкладки на площинах $x = 0$; $x = 0,5 L_A$; $x = 0,5 L_B$; $x = 0,5 L_C$; $x = 0,8 L_B$; $x = 0,1$ мкм; $x = 0,2$ мкм; $x = 0,3$ мкм до кінця дії теплових джерел (часток-іонів і крапель, сконденсованих на підкладку)

Розподіл температурних напруг, отриманий в результаті впливу сконденсованих різних розмірів крапель титану (0,1; 0,2; 0,3 мкм), по глибині підкладки заліза показано на рис. 6., розподіл за радіусом – на рис. 7.

На рис. 8 наведена тривимірний графік, що показує розподіл температурних напруг, розподілених по глибині підкладки на площинах $x = 0$; $x = 0,5 L_A$; $x = 0,5 L_B$; $x = 0,5 L_C$; $x = 0,8 L_B$; $x = 0,1$ мкм; $x = 0,2$ мкм; $x = 0,3$ мкм до кінця дії теплових джерел (часток-іонів і крапель, сконденсованих на підкладку), частки А – частка N ($z = 3 E = 250 \text{ эВ}$), В – частка N ($z = 3 E = 1000 \text{ эВ}$), С – частка Ti ($z = 3 E = 1000 \text{ эВ}$); краплі: AA – краплі

лі Ti ($r = 0,1$ мкм), BB – краплі Ti ($r = 0,2$ мкм), CC – краплі Ti ($r = 0,3$ мкм).

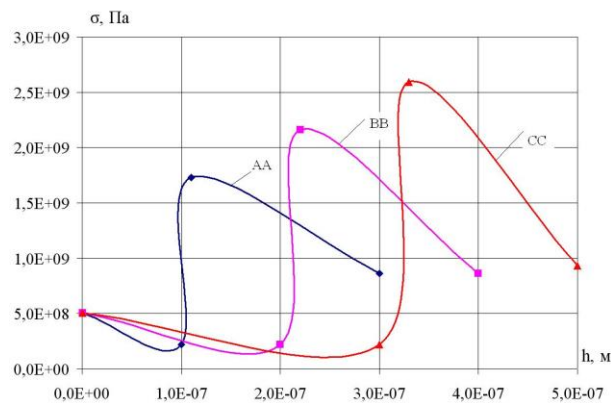


Рис. 6. Розподіл температурних напруг, отриманий в результаті впливу сконденсованих різних розмірів крапель AA, BB і CC по глибині підкладки

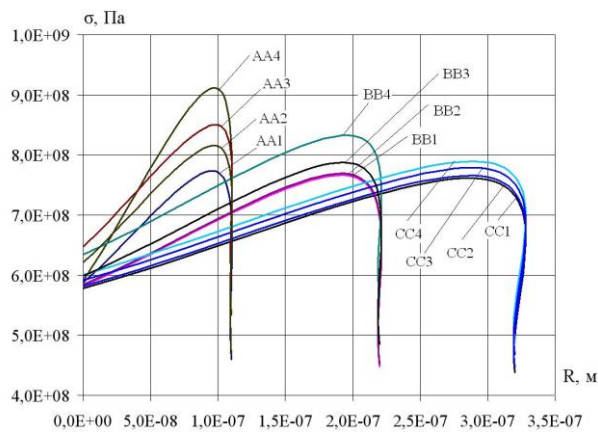


Рис. 7. Розподіл температурних напруг, отриманий в результаті впливу сконденсованих крапель AA_i, BB_i і CC_i ($i = 1,4$), за радіусами дії температур підкладки заліза в різних площинах ($i = 1$ – площа, розташована на глибині $x = 0,5L_C$; $i = 2$ – площа, розташована на глибині $x = 0,5L_A$; $i = 3$ – площа, розташована на глибині $x = 0,5L_B$; $i = 4$ – площа, розташована на глибині $x = 0,8L_B$)

Висновки

Проведені розрахунки полів температур і температурних напруг в обсязі, де діють іони та їх температурні поля, краплі та їх температурні поля дозволяють стверджувати: в зоні дії крапель розміром від 100 до 350 нм реалізуються поля температур на поверхні від максимальної температури 802 К, на глибині половинного пробігу частинки С ($E = 1000$ еВ) вона підвищується до 807-817 К, на глибині половинного пробігу частки А ($E = 250$ еВ) температура збільшується до 808-822 К, на глибині половинного пробігу частки ($E = 1000$ еВ) температу-

ра сягає 822-863 До, на глибині $x = 0,8L_B$ температура лежить у межах – 835-900 К.

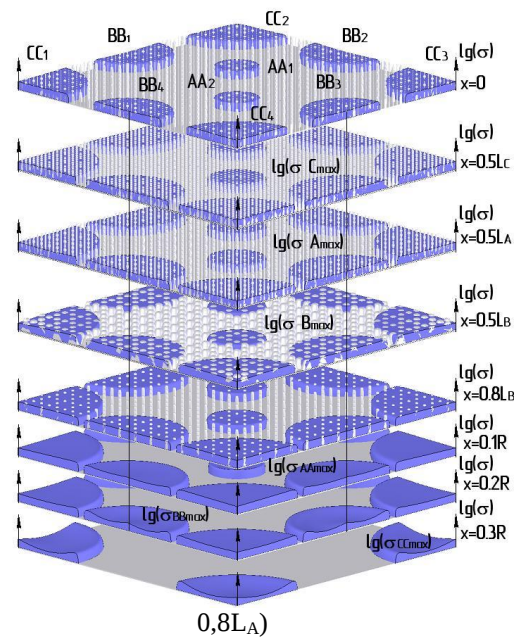


Рис. 8. Тривимірний графік, що показує розподіл температурних напруг, розподілених по глибині підкладки на площинах $x = 0$; $x = 0,5 L_A$; $x = 0,5 L_B$; $x = 0,5 L_C$; $x = 0,8 L_B$; $x = 0,1$ мкм; $x = 0,2$ мкм; $x = 0,3$ мкм до кінця дії теплових джерел (часток-іонів та крапель, сконденсованих на підкладку)

Температурні напруги в зоні дії цих температурних полів становлять у першому випадку ($x = 0$) величину $5 \cdot 10^8$ Па, у другому - ($x = 0,5 L_C$) температурні напруги лежать у межах $7,59 \cdot 10^8$ - $7,72 \cdot 10^8$ Па, далі, при $x = 0,5 L_A$ температура напруги досягають $7,67 \cdot 10^8$ - $7,76 \cdot 10^8$ Па, при $x = 0,5 L_B$ – $7,76 \cdot 10^8$ - $8,15 \cdot 10^8$ Па, при $x = 0,8 L_B$ – $7,88 \cdot 10^8$ - $8,5 \cdot 10^8$ Па.

У разі дії іонів різних сортів, енергій та зарядностей коливання температури на поверхні підкладки становлять 275 - 417 К, у площині ($x = 0,5 L_C$) температура становить – $4,34 \cdot 10^4$ - $1,57 \cdot 10^6$ К; у площині, розташованій на глибині половини вільного пробігу азоту ($E = 250$ еВ) з зарядним числом 3, температура становить $6,92 \cdot 10^4$ - $8,42 \cdot 10^5$ К; наступні дві площини розташовані на глибинах $x = 0,5 L_B$ і $x = 0,8 L_B$, паралельно поверхні (частка В – N, $E = 1000$ еВ), до цих площин проникає температурне поле тільки частинки, його максимум становить $3,25 \cdot 10^5$ та $1,44 \cdot 10^5$ К на відповідній площині.

При дії іонів спостерігаються також температурні напруги, які на поверхні становлять $6,49 \cdot 10^8$ - $2,34 \cdot 10^{10}$ Па, в наступній площині ($x = 0,5 L_C$) напруги становить $4,69 \cdot 10^9$ - $9,99 \cdot 10^{10}$ Па; у площині, розташованій на глибині половини вільного пробігу азоту ($E = 250$ еВ) із зарядним числом 3, напруга

становить $4,69 \cdot 10^9 - 9,96 \cdot 10^{10}$ Па; наступні дві площини розташовані на глибинах $x = 0,5 L_B$ і $x = 0,8 L_B$, паралельно поверхні (частка В – N, $E = 1000$ eV), до цих площин проникає поле температурних напруг тільки частки В, його максимум становить $2,46 \cdot 10^{10}$ та $2,29 \cdot 10^{10}$ Па на відповідній площині.

Все це показує, що є можливість утворення наноструктур за рахунок дії іонів, а також є досить висока ймовірність їх утворення в зоні дії крапель.

Література

1. Костюк Г.И. Наноструктуры и нанопокр-тия: перспективы и реальность [Текст] : учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
2. Костюк Г. И. Получение наноструктур в объеме детали при комбинированном упрочнении [Текст] / Г.И. Костюк, О.М. Мелкозерова // Вісті

академії інженерних наук України : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – №1(38). – Х., 2009. – С. 12-20.

3. Мелкозерова О.М. Образование наноструктур TiN в поверхностном слое железа при действии ионов различных сортов, зарядностей и энергий [Текст] / О.М. Мелкозерова // Вопросы проектирования и производства конструкции летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. Ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(63). – Х., 2010. – С. 24-30.
4. Гречихин Л.И. Физика наночастиц и нанотехнологий. Общие основы, механические, тепловые и эмиссионные свойства [Текст] : монография / Л.И. Гречихин. – Мн. : УП «Технопринт», 2004. – 399 с.
5. Аксенов И.И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы [Текст] / И.И. Аксенов. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2005. – 212 с.

Надійшла до редакції 8.04.2011

Рецензент: д-р техн. наук., проф., зав. каф. Технології проектування авіаційних двигунів, А.І. Долматов, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Україна

ИНЖЕНЕРНА МОДЕЛЬ ДІЇ ЙОНІВ РІЗНИХ СОРТІВ, ЗАРЯДНОСТЕЙ ТА ЕНЕРГІЙ І КРАПЕЛЬ, СКОНДЕНСОВАНИХ НА ПОВЕРХНІ

Г.І. Костюк, О.М. Мелкозьорова

При взаємодії матеріалу з йонами або плазмовими струмами на поверхні деталі та в її поверхневому шарі існує ряд процесів, які впливають на якість покриттів, їх состав, швидкість їх нанесення. Дана інженерна модель дії струму заряджених частинок різних сортів, зарядностей, енергій, та також крапель матеріалу, які були сконденсовані на положку. Розраховані поля температур та температурних напружень, швидкостей їх зростання, які доказують можливість одержання наноструктурних матеріалів, як на глибині деталі, так і на її поверхні у вигляді покриття нанометрової товщини, яке має високу адгезію до основного матеріалу.

Ключові слова: наноструктура, температурні поля, температурні напруги, швидкості зростання температур

ENGINEERING MODEL OF THE ACTION OF DIFFERENT KIND CHARGE AND ENERGY PARTICLES AND DROPS CONDENSAT AT THE SURFACE

G.I. Kostyk, O.M. Melkozerova

At interaction of surfaces with ionic beams or plasma streams on a surface of a firm body and in its superficial layer a number of processes which determine quality of received coverings, their structure, speed of their drawing and the certain quality of a product proceeds. The engineering model of action of a stream of the charged particles of various grades, charge and energy, and also drops of a material, condensate on the substrate is offered. Fields of temperatures and temperature pressure, speeds of increase of temperatures which prove about an opportunity of reception nanostructure materials, both on depth of a material, and on its surface in the form of a covering nanometre thickness which has very good adhesion to the basic material have been received.

Keywords: nanostructure, temperature fields, temperature pressure, speeds of increase of temperatures

Костюк Геннадій Ігорович – д-р техн. наук., проф., зав. каф. Робототехнічних систем і комплексів, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Україна.

Мелкозьорова Ольга Михайлівна – асп. каф. Робототехнічних систем і комплексів, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Україна, e-mail: olja.mex@gmail.com.