ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 9, № 4 (2008) С. 901-904

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 9, № 4 (2008) P. 901-904

УДК 621.78:669.71:517.9

ISSN 1729-4428

О.І. Денисенко[1], В.І. Цоцко[2], І.М. Спиридонова[3], Б.Г. Пелешенко[2]

Формування поля температур тонкої стрічки під впливом руху по її поверхні дисперсної фази двофазного струменя

[1]Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, м. Дніпропетровськ, 49600, Україна,
[2]Дніпропетровський державний аграрний університет, вул. Ворошилова, 25,
м. Дніпропетровськ, 49600, Україна,
[3]Дніпропетровський національний університет, пров. Науковий, 13, м. Дніпропетровськ, 49050, Україна
E-mail: dsaupelesh@mail.ru

Методами аналітичного і чисельного моделювання досліджувалася динаміка формування поля температур у тонкій металевій стрічці під впливом дисперсної фази переміщуваного по її поверхні плоского двофазного високошвидкісного струменя. На прикладі алюмінію досліджені умови формування на поверхні і динаміка руху в товщу стрічки фронту розплаву. Отримані результати можуть бути використані при формуванні металокомпозитних і антикорозійних шарів на металевих стрічках, а також для розрахунку параметрів циклічності при багаторазовому впливові на її поверхню дисперсної фази двофазного струменя.

Ключові слова: поле температур, алюміній, мікрочастинка, дисперсна фаза, тонка стрічка.

Стаття поступила до редакції 07.05.2008; прийнята до друку 15.09.2008.

Вступ

В даний час в різних галузях промисловості знаходять все більш широке застосування композиційні матеріали та матеріали з покриттям, що мають комплекс властивостей, відмінних від властивостей вихідних матеріалів. Нанесення покрить на поверхню виробів дозволяє надати їм, в залежності від призначення, корозійну та зносостійкість, інші функціональні властивості. Одним із способів нанесення покрить, що ґрунтується на принципі імпульсної обробки поверхні виробу частинками порошкового матеріалу, є спосіб газодинамічного напилення. Головна його відмінність від традиційних способів газотермічного напилення полягає в тому, що утворення міцного зчеплення при контактуванні з основою можливе тільки за рахунок пластичної деформації і нагрівання частинок при ударі [1, с. 83].

Для покращення технологічних та електрохімічних характеристик композитних функціональних матеріалів у галузі енергетики дуже перспективним є застосування метало- композитних електродних структур, що формуються інжекцією двофазного струменя частинок дисперсної фази з литованих оксидів металів в поверхневий шар провідника [2, с.93]. Особливу практичну зацікавленість в зв'язку з технологічною перспективністю становить дослідження можливості застосування тонкої металевої стрічки, що переміщується відносно діючого на неї двофазного струменя. Можливість розриву стрічки, із-за втрати механічної міцності, внаслідок часткового або повного проплавлення при енергетичній дії двофазного струменя виступає при цьому одним із головних факторів ризику.

Відомі [3, с.112] оцінки середньої питомої потужності ударної дії мікрочастинки на підложку, одержані з врахуванням величини її кінетичної енергії в залежності від швидкості на момент часу безпосередньо перед ударною взаємодією і ймовірного інтервалу часу взаємодії. Середня питома потужність інтегральної взаємодії дисперсної фази на підложку визначається об'ємною концентрацією мікрочастинок в двофазному струмені і для модельних розрахунків може бути прийнята на 2-4 порядки меншою від величини середньої питомої потужності ударної взаємодії, характерної для окремої мікрочастинки.

I. Постановка задачі

Методами аналітичного і чисельного моделювання дослідити динаміку формування поля температур у тонкій стрічці із алюмінію під впливом дисперсної фази переміщуваного по її поверхні плоского двофазного високошвидкісного струменя, а також умови формування на поверхні і динаміку руху в глибину стрічки фронту розплаву.

II. Результати дослідження та їх обговорення

Досліджувалась можливість проплавлення стрічки з алюмінію і розподіл температури в ній при дії на одну з її поверхонь дисперсної фази високошвидкісного двофазного струменя заданої інтенсивності: середня інтенсивність – $5\cdot10^2$ Вт/см^2, гранична – 10^5 Вт/см^2.

Алюмінієва стрічка шириною 4 см і товщиною 50 мкм протягувалась з заданою в межах 0,1÷20 см/с швидкістю повз прямокутної щілини 4 мм × 40 мм, що формувала і випромінювала двофазний струмінь. При цьому навантаження потоком дисперсних частинок фрагмента стрічки довжиною 4 мм триває від 0,02 с до 4 с. Граничні умови на протилежній відносно випромінювання поверхні стрічки допускали варіювання.

На першому етапі вирішувалась задача оцінки часу проплавлення поверхневого шару алюмінієвої стрічки на глибину ≈ 10 мкм, виходячи з мінімальної реальної температури на її робочій поверхні, достатньої для початку плавлення алюмінію – температури плавлення 660°С [3, с.172], [4, с. 154] і необхідного ступеню перегріву – 10-30°С [5, с. 40]. Аналітичний розрахунок в наближенні напівнескінченої моделі [6, с. 260], яку достатньо просто реалізувати шляхом розміщення стрічки на масивну однорідну до матеріалу стрічки підложку, дав наступні результати.

Розв'язок поставленої задачі (задачі Стефана) методом подібності [6, с. 255] зводиться до визначення параметра швидкості руху фронту плавлення α, який зв'язує переміщення фронту x^* з часом t: $x^* = \alpha\sqrt{t}$. Параметр α визначається з трансцендентного рівняння

$$\frac{k_1 c_s \exp\left(-\frac{\alpha^2}{4a_1^2}\right)}{a_1 \Phi\left(\frac{\alpha}{2a_1}\right)} + \frac{k_2 c_m \exp\left(-\frac{\alpha^2}{4a_2^2}\right)}{a_2\left[1-\Phi\left(\frac{\alpha}{2a_2}\right)\right]} = \frac{\sqrt{\pi}}{2}\lambda\rho\alpha,$$

де k_1, a_1^2 та k_2, a_2^2 – коефіцієнти теплопровідності і температуропровідності рідкої та твердої фаз, відповідно; c_s - ступінь перегріву поверхні, c_m - ступінь вихідного переохолодження металу стрічки; ρ та λ - густина та питома теплота плавлення металу; Φ – функція похибок Гаусса [7, с. 579]

Числені значення коефіцієнтів теплопровідності k_1 = 130 Вт/(м·К) і k_2 = 175 Вт/(м·К), питомих теплоємностей c_1 = 1084 Дж/(кг·К) і c_2 = 992 Дж/(кг·К), густин $\rho_1 = 2{,}4\cdot10^3$ кг/м^3 і $\rho_2 = 2{,}7\cdot10^3$ кг/м^3, питомої теплоти плавлення $\lambda = 393\cdot10^3$ Дж/кг, а також розрахункові величини $a_1^2 = k_1/(c_1\cdot\rho_1) = 50\cdot10^{-6}$ м^2/с і $a_2^2 = k_2/(c_2\cdot\rho_2) = 65{,}3\cdot10^{-6}$ м^2/с визначались за даними: [1, с. 56, 265, 142, 172], [4, с. 145, 146, 156, 167, 171], [8, с. 34, 42].

Параметр швидкості плавлення α при перегріві робочої поверхні на 10°С становив 0,163 мм/с$^{1/2}$, при 20°С підложки. Підігрів моделі до 300°С давав значення α рівним 0,285 мм/с$^{1/2}$.

При перегріві 30°С та вихідній температурі моделі 20°С α = 0,47 мм/с$^{1/2}$, а підігрів до 300°С моделі при тому ж перегріві поверхні дає значення α = 0,78 мм/с$^{1/2}$.

Таким чином, час досягнення фронтом розплаву контрольної точки 10 мкм для всіх режимів коливався в межах 0,16-3,7 мс. А умовне проплавлення стрічки наскрізь протікало б за 4,1-94 мс, що менше часу експозиції для стандартних швидкостей протяжки стрічки. Інакше – не залежно від швидкості протяжки стрічки ефект глибокого проплавлення стрічки обов'язково повинен проявитися.

На другому етапі дослідження чисельний розрахунок методом скінчених різниць з застосуванням формул прогонки, що ґрунтувався на раніше розробленій методиці для моделі на основі заліза [9], дав наступну картину проплавлення поверхневого шару стрічки. Головну роль в швидкості плавлення стрічки відіграє перегрів робочої поверхні стрічки, а підігрів самої стрічки – другорядний. На рис. 1 приведено розподіл температури по товщині стрічки в момент початку плавлення поверхні, через час t_0 = 6,87 мкс після включення вихідної температурної дії 690°С на її поверхню (перегрів 30°С). Динаміка процесу плавлення стрічки приведена на рис. 2.

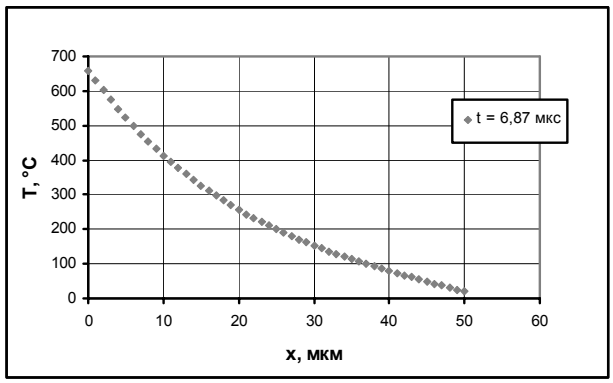

Рис. 1. Розподіл температури по товщині стрічки в момент початку плавлення поверхні (t_0 = 6,87 мкс).

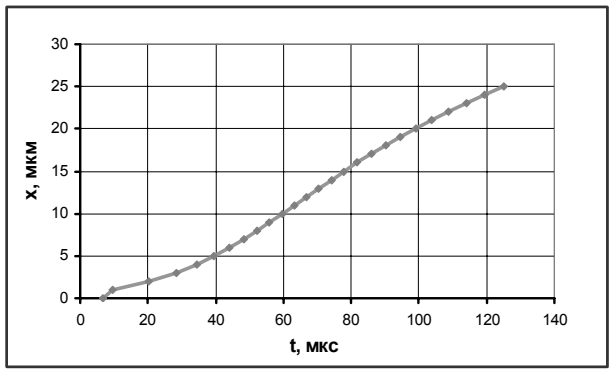

Рис. 2. Переміщення фронту плавлення від поверхні в глибину стрічки з плином часу (t_0 = 6,87 мкс).

В порівнянні з напівнескінченою моделлю з аналогічними термічними параметрами час досягнення фронтом розплаву контрольної глибини 10 мкм для конечної моделі зменшився з 453 до 60

мкс.

Постільки загальна експозиція опромінення стрічки інтенсивним потоком частинок знаходиться в діапазоні 0,02-4 с, то ефект наскрізного проплавлення стрічки чи, в крайньому разі, проплавлення до середини її товщини буде забезпечений

Визначимо інтенсивність потоку частинок, діючих на поверхню стрічки, необхідну для досягнення на поверхні температур T_0 = 670-690°С, що забезпечують ефект проплавлення поверхневого шару стрічки.

Розглянемо модельне наближення, в якому інтенсивність потоку частинок I в умовах відсутності теплових втрат повністю переходить в еквівалентну густину теплового потоку в стрічці

$$j = k\nabla T,$$

де k – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стрічки, ∇T – градієнт температури в стрічці. У випадку жорсткої граничної умови для температури на протилежній нагріву поверхні стрічки $T_l = const$ (в звичайних умовах 20°С), в крайньому разі дана умова виконується в початковий період обробки до реалізації процесу плавлення поверхні стрічки, можна робити відлік від вказаної опорної температури. Нехтуючи теплопередачею вздовж стрічки, а також енергією, що витрачається на випромінювання, одержимо

$$I = k\frac{T_0 - T_l}{l},$$

де l - товщина стрічки (l = 50 мкм), звідки і визначається інтенсивність I.

Середнє значення коефіцієнта теплопровідності алюмінію для досліджуваного інтервалу температур становить 175 Вт/(м·К), початкова температура підложки (без підігріву) – 20°С, звідси $I \approx 2,3 \cdot 10^9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

У випадку теплоізоляції задньої поверхні стрічки температура T_l досягає в момент (9,53 мкс) початку плавлення поверхні нагріву $\approx$130°С, що дає значення інтенсивності $I \approx 2 \cdot 10^9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Проведені розрахунки дещо спотворюють картину процесу, постільки вони відповідають установленому, стаціонарному розподілу температури в стрічці. В дійсності градієнт температури в поверхневому шарі стрічки переважає його середнє значення, застосоване в розрахунку. Але це означає ще більш високі інтенсивності дії на поверхню, необхідні для її плавлення, так що одержані результати позначають їх нижню границю.

Постільки середня інтенсивність потоку частинок, що діє на поверхню стрічки, оцінюється величиною $I_{\text{ср}} \approx 5 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, а максимальна інтенсивність може досягати $I_{\text{макс}} \approx 10^9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ з часом дії порядку 1 мкс, то можна зробити висновок про неможливість суцільного проплавлення поверхні стрічки навіть на мінімальну ($\approx$1 мкм) глибину. При цьому, не слід повністю виключати можливість утворення незначних, локальних флуктуативних оплавлень поверхні.

На третьому етапі дослідження, в умовах теплоізоляції задньої поверхні стрічки, тим же методом [9], з врахуванням відліку температури на оброблюваній поверхні від температури в першому розрахунковому вузлі і заданій інтенсивності дії на поверхню, був визначений розподіл температури в стрічці при дії на її поверхню граничної інтенсивності $I_{\text{макс}}$ впродовж максимального часу її підтримання t = 1 мкс і середньої інтенсивності $I_{\text{ср}}$ впродовж часу загальної експозиції 0,02-4 с (рис. 3). Достатня збіжність обчислень при просторовому кроці обчислень 1 мкм забезпечувалась часовим розрахунковим кроком 0,01-0,001 мкс.

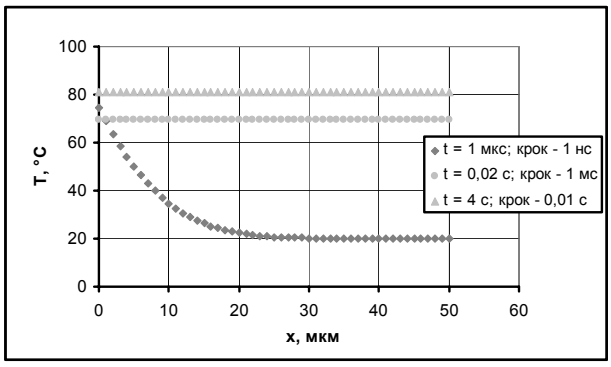

Рис. 3. Розподіл температури по товщині стрічки: 1) при дії $I_{\text{макс}}$ впродовж 1 мкс; 2) при дії $I_{\text{ср}}$ впродовж 0,02 с та 4 с.

Як випливає з рис. 3, температура поверхні стрічки при дії $I_{\text{макс}}$ впродовж 1 мкс мало відрізняється від фінішної температури на поверхні при дії $I_{\text{ср}}$ в заданих рамках експозиції. Розподіл температури по товщині стрічки кардинально змінюється після дії випромінюванням протягом 10-100 мкс, за рахунок наскрізного прогрівання стрічки.

Висновки

Методами аналітичного і чисельного моделювання досліджено динаміку формування поля температур у тонкій стрічці із алюмінію під впливом дисперсної фази переміщуваного по її поверхні плоского двофазного високошвидкісного струменя, а також умови формування на поверхні і динаміку руху в товщу стрічки фронту розплаву. Визначено температурне поле по глибині стрічки при заданих параметрах енергетичної дії на оброблювану поверхню стрічки.

При заданих інтенсивностях і експозиціях дії на поверхню алюмінієвої стрічки високошвидкісного струменя проплавлення поверхневого шару стрічки не досягається. Для підсилення зчеплення частинок струменя з поверхнею стрічки потрібне створення в поверхневому шарі стрічки деякої порогової температури («температурного п’єдесталу») на момент осадження частинок, постільки сам струмінь виконує вказану функцію частково.

Денисенко О.І. **–** кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики;
Цоцко В.І. – старший викладач кафедри фізики та матеріалознавства;
Спиридонова І.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач відділом динамічної металофізики;
Пелешенко Б.Г. – кандидат фізико-математичних наук, професор кафедри вищої математики .

[1] В.Н. Данченко, А.Н. Головко. Газодинамическое напыление металлических порошков // *Физика импульсной обработки материалов* / Под ред. проф. В.В. Соболева. – АРТ-ПРЕСС, Днепропетровск. сс. 83-112 (2003).
[2] А.И. Денисенко. Преимущества и ограничения инжекционного метода формирования металлокомпозитного катода // *Теория и практика металлургии*, (4-5), сс. 94-97 (2007).
[3] А.И. Денисенко. К инжекционному методу формирования металлокомпозитного катода // *Физика и техника высокоэнергетической обработки материалов*. АРТ-ПРЕСС, Днепропетровск. сс. 108-118 (2007).
[4] А.С. Енохович. *Справочник по физике*. Просвещение, М. 415 с.(1978).
[5] А.П. Гуляев *Металловедение.* Металлургия, М. 544 с.(1986).
[6] А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. *Уравнения математической физики.* Наука, М. 736 с. (1972).
[7] Г. Корн, Т. Корн. *Справочник по математике*. / Под общ. ред. И.Г. Арамановича. Наука, М. 831 с. (1974).
[8] Б.Г. Лившиц. *Физические свойства металлов и сплавов*. Машгиз, М. 352 с. (1956).
[9] В.І. Цоцко, І.М. Спиридонова, Б.Г. Пелешенко. Аналітичне дослідження кінетики нагрівання та плавлення поверхні зразків низьковуглецевої сталі при місцевій термообробці // *Фізика і хімія твердого тіла,* **9**(2), сс. 167 (2008).

A.I. Denisenko[1], V.I. Tsotsko[2], I.M. Spiridonova[3], B.I. Peleshenko[2]

Formation of Thin Tape Temperature Field under Effect of Two-Phase Jet Dispersed Phase on Tape Surface

[1]National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina Ave., 4, Dnipropetrovsk, 49600, Ukraine
[2]Dnepropetrovsk State AgrarianUniversity, Voroshylova Str., Dnipropetrovsk, 49600, Ukraine
[3]Dnepropetrovsk National University, Naukovy Side Str., 13, Dnipropetrovsk, 49050, Ukraine
E-mail: dsaupelesh@mail.ru

Using the methods of analytical and numerical modeling, there was studied the dynamics of temperature field formation in a thin metal tape in conditions of effect of dispersed phase of the plane two-phase fast jet moved along its surface. The conditions of melt front formation on the surface and dynamics of its moving into the tape thickness were studied on aluminum taken as an example. The received results can be used for the formation of metal composite and anticorrosion layers on metal tapes as well as for calculation of the cyclicity indices in conditions of multiple effects of the disperse phase of two-phase jet on the tape surface.