

УДК [621.793:519.87]-047.37

В. В. БІЛЯЄВА^{1*}, О. І. ГУБІН², Ю. В. БРАЗЛУК³

^{1*}Каф. «Енергетичних систем та енергоменеджменту», Український державний університет науки і технологій, ННІ УДХТУ, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 101 19 78, ел. пошта vikabelyaeva604@gmail.com, ORCID 0000-0001-9987-6384

²Каф. аерогідромеханіки та енергомасопереносу, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Науки, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (099) 319 47 91, ел. пошта hubin_o@365.dnu.edu.ua, ORCID 0000-0001-9434-2367

³Каф. аерогідромеханіки та енергомасопереносу, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Науки, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (050) 582 71 71, ел. пошта brazaluk_jv@ukr.net, ORCID 0000-0001-6448-8525

Чисельне дослідження процесу затвердіння тонкого покриття на поверхні тіла

Мета. Плазмове напилення широко застосовується для зміцнення та відновлення робочих поверхонь деталей виробів, що зумовлено сукупністю його техніко-економічних переваг та високою ефективністю процесу. Активне використання цієї технології, зокрема під час обробки деталей широкої номенклатури, обумовлює підвищені вимоги до рівня застосовуваного обладнання та якості вихідних матеріалів. Водночас метод плазмового напилення покриттів має низку обмежень, які водночас слугують потенційним резервом для подальшого вдосконалення технологічних рішень. Ефективним методом розв'язку таких задач є використання математичних моделей. Основна мета роботи полягає у побудові нелінійної математичної моделі затвердіння покриття на поверхні тіла з урахуванням температурної залежності теплофізичних характеристик. **Методика.** Математична модель для дослідження процесу затвердіння покриття на поверхні тіла включає в себе рівняння теплопровідності для твердої кірки і основи. Чисельне інтегрування моделюючих рівнянь здійснюється за допомогою неявного різницевого методу з ловлею фронту у вузол сітки. **Результати.** Розроблено комп'ютерну програму, за допомогою якої можливо проведення чисельних досліджень процесів затвердіння титанового та алюмінієвого покриттів на сталевій основі. Наведено результати чисельного моделювання. **Наукова новизна.** Розроблено нелінійну математичну модель для дослідження процесу затвердіння тонкого покриття на поверхні тіла. Модель базується на чисельному інтегруванні рівнянь теплопровідності для твердої кірки і основи та дозволяє визначити зміну в часі температури в різних точках системи «основа – покриття». **Практична значимість.** Розроблена математична модель може бути корисною при дослідженні затвердіння покриття напиленого на поверхню тіла, а також при виборі режимних параметрів процесу плазмового напилення. Вона забезпечує наукове обґрунтування параметрів процесу та режимів роботи застосовуваного обладнання. Модель дозволяє оцінювати динаміку формування теплових полів у процесі затвердіння покриттів.

Ключові слова: плазмове напилення; затвердіння покриття; температурне поле; фронт фазового переходу; математична модель

Вступ

На сучасному етапі науково-технічного прогресу зростають вимоги до міцнісних характеристик конструкційних матеріалів. Покриття, отримані розпиленням матеріалів високотемпературним газовим струменем на підкладку з подальшою термічною обробкою нанесених матеріалів забезпечують необхідні характеристики конструкційних матеріалів та знаходять все більш широке використання. Практичний досвід використання покриттів, накопичений за останні 20–30 років у галузях промисловості,

показує, що таким шляхом можна, як правило, в 2–5 разів зменшити знос деталей машин, що експлуатуються в різних умовах. Ефективність технології також підтверджена при захисті виробів від корозії та теплових руйнувань [1, 4].

Плазмове напилення широко застосовується для зміцнення і відновлення робочих поверхонь деталей виробів. До істотних техніко-економічних переваг технології відносяться: висока продуктивність процесу; отримання високоякісного покриття, особливо в умовах загального захисту; наявність великої кількості технологічних факторів, варіювання яких забез-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

печує гнучке регулювання процесу напилення; високий коефіцієнт використання порошкового матеріалу; широка доступність методу як в основному, так і ремонтному виробництві; економічність; невисока вартість найпростішого обладнання; можливість комплексної механізації і автоматизації процесу та ін.

Широке застосування плазмового напилення покриттів, особливо для зміцнення і відновлення робочих поверхонь деталей виробів широкої номенклатури, обумовлює необхідність підвищення рівня застосовуваного обладнання та матеріалів. Метод плазмового напилення покриттів має також ряд недоліків, які по суті є резервом в удосконаленні технології.

У комплект обладнання для плазмового напилення входять наступні вузли: плазмотрон, механізм транспортування порошкових або дротяних матеріалів; пульт управління, в якому зосереджені вимірювальні, регульовальні і блокувальні пристрої; джерело живлення дуги; джерело і приймач охолоджуючої води; комплекс комунікацій, що з'єднує окремі вузли установки і забезпечує підведення до плазмотрону газів, електроенергії, води, що охолоджує.

Струм, плазмоутворюючий газ, вода що охолоджує, які підводяться до установки взаємопов'язані. Взаємозв'язок полягає в тому, що електрична схема включення напруги, що підводиться від джерела струму до плазмового пальника, заблокована контактами реле тиску, встановленими в системі охолодження водою, а також контактами реле тиску, встановленими в системі харчування плазмоутворюючим газом.

Плазмове напилення в порівнянні з газополуменим і дуговим має ряд переваг [4, 5]:

- дозволяє наносити покриття з матеріалів широкого складу (метали, сплави, оксиди, карбіди, нітриди, бориди, пластмаси та їх різні композиції) на різноманітний матеріал основи (метали, кераміка, графіт, пластмаси та ін.);

- плазмові пальники дозволяють в широких межах регулювати енергетичні характеристики плазми, що полегшує отримання покриттів з властивостями, зумовленими вимогами технології;

- використання в плазмових пальниках інертних газів, що не містять кисню, сприяє зменшенню окислення напилюваного матеріалу і поверхні деталі;

- покриття, отримані плазмовим напиленням, за фізико-механічними властивостями перевершують покриття, отримані газополуменим і дуговим способами напилення.

Технологічний процес відновлення деталей плазмовим напиленням включає наступні операції: підготовка порошку, поверхні деталі, напилення і механічна обробка напилених покриттів [7, 8].

Підготовка порошку полягає в сушінні на деках при температурі 150–200 °С. Для підбору порошоків з певною дисперсністю гранул їх слід просівати через сито з розмірами вічок, що відповідають розмірам необхідних гранул.

Підготовці поверхні деталі до напилювання має першочергове значення, оскільки від її якості значною мірою залежить міцність зчеплення частинок порошку з поверхнею деталі [5, 6].

Деталі, що підлягають покриттю, очищають від бруду, масла в миючих препаратах, а потім сушать. Чавунні деталі, що працюють тривалий час в масляному середовищі, при очищенні піддають сушці в шафі або печі при температурі 250–300 °С. Після очищення (в разі потреби видалення слідів зносу і додання деталі правильної геометричної форми) їх піддають механічній обробці. Основною підготовчою операцією є утворення на поверхні необхідної шорсткості, яка має суттєвий вплив не тільки на міцність зчеплення напилюваного шару з підкладкою, але і на втому відновлюваної деталі.

Найбільш раціональний метод створення шорсткості, що в меншій мірі знижує опір втоми деталі, дробоструйна обробка металевої чавунної крихтою з розміром частинок 1,5–2 мм при тиску повітря 0,5–0,6 МПа. Інші методи отримання на поверхні шорсткості (нарізування різьблення, електроіскрова або електромеханічна обробка, анодно-механічне шліфування) знижують опір втоми деталі. Відновлювану поверхню перед обробкою слід знежирити. Ділянки, прилеглі до поверхні, яка підлягає покриттю, захищають спеціальним екраном [9, 10].

Напилювати покриття слід відразу після дробеструйної обробки, так як вже через 2 години її активність зменшується через збільшення на обробленій поверхні оксидної плівки.

При плазмовому напиленні у якості напилюваних матеріалів застосовують порошки (рис. 1, а), дроти й прутки (рис. 1, б).

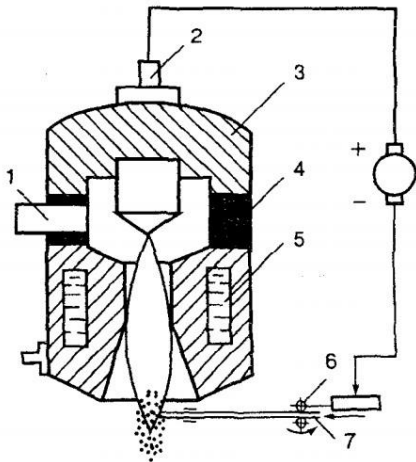
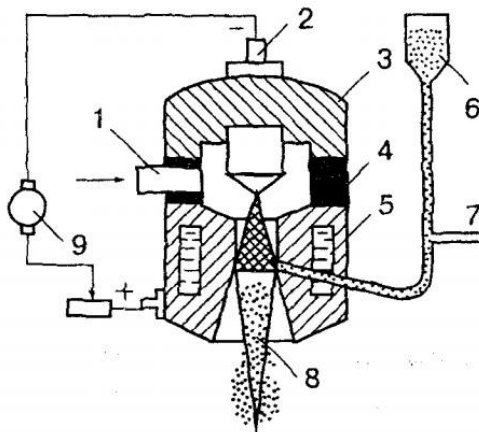
a – a*б – б*

Рис. 1. Схема плазмового напилення
a – порошком; *б* – дротом:

- 1 – підведення плазмоутворюючого газу;
- 2 – катод плазмотрона; 3 – корпус катода; 4 – ізолятор;
- 5 – корпус анода; 6 – порошковий живильник (механізм подачі дроту, рис. 1, б);
- 7 – підведення газу, що транспортує порошок;
- 8 – плазмовий струмінь;
- 9 – джерело живлення

Fig. 1. Plasma spraying scheme
a – powder; *b* – wire:

- 1 – plasma-forming gas supply; 2 – plasma torch cathode;
- 3 – cathode housing; 4 – insulator;
- 5 – anode housing;
- 6 – powder feeder (wire feed mechanism, Fig. 1, b);
- 7 – gas supply that transports powder;
- 8 – plasma jet;
- 9 – power source

Найбільш широкого поширення набула наплавка порошками.

Критерієм, що визначає практичну можливість застосування того чи іншого напиленого

шару, є міцність його зчеплення з основним металом. Питання про природу зв'язку між покриттям і основним металом до теперішнього часу залишається спірним. Вважається, що зчеплення напилюваного шару з поверхнею носить чисто механічний характер і ґрунтується на дії сил адгезії, величина яких залежить від кінетичної енергії частинок і надлишкової енергії поверхневого шару. У той же час процес формування частинок з матеріалом підкладки ряд авторів умовно розбивають на три стадії: утворення фізичного контакту; активація контактних поверхонь і утворення міцних хімічних зв'язків на межі розділу частинка-підкладка; розвиток об'ємної взаємодії (релаксаційні процеси, гетеродифузія, утворення нових фаз).

Залежно від властивостей напилених металевих частинок, нагрівання основи, а також способу і режиму напилення, частки можуть досягати підкладки в рідкому, пластичному або твердому стані, тобто міцність зчеплення визначається станом частинки і напилювальної поверхні в кожен конкретний момент. Істотний вплив на формування і міцність зчеплення покриттів надає температура поверхні оброблюваної деталі. Таким чином, крім підготовки поверхні, на якість формування покриття і продуктивність процесу напилення великий вплив мають хімічний склад і властивості порошку, його грануляція, витрата, умови доставки до підкладки, склад газового середовища, кількість теплоти, що передається часткам порошку і деталі [4].

Для здійснення наведених факторів з метою отримання заданих експлуатаційних властивостей покриттів необхідно, щоб порошкові сплави і конструкції плазмотронів відповідали певним вимогам. Оскільки при транспортуванні порошку в плазмовий струмінь утворюється двофазний потік, що складається з частинок порошку і несучого його плазмового струменя, то зазначені фактори слід розглядати в комплексі.

Отже, плазмове напилення є багатоетапним та доволі вартісним процесом, тому важливим і необхідним є математичне моделювання відповідних його стадій.

Мета

Побудова нелінійної математичної моделі затвердіння покриття на поверхні тіла з урахуванням температурної залежності теплофізичних характеристик; розробка різницевої схеми для побудованої математичної моделі; створення алгоритму розв'язання задачі та її програмної реалізації; здійснення числових досліджень температурних полів системи основа-покриття та закону руху фронту затвердіння.

Методика

Розглянемо процес затвердіння металевого покриття товщиною δ на поверхні тіла (рис. 2). Покриття нанесено на поверхню методом плазмового напилення і в початковий момент часу знаходиться повністю в рідкому стані, його перегрів над температурою фазового переходу T_f незначний, тому їм будемо нехтувати і вважати, що в початковий момент часу по всій товщині рідкого покриття температура дорівнює T_f . Температура тіла (основи) в початковий момент часу постійна і дорівнює $T_0 < T_f$. Товщина тіла істотно більше товщини покриття, тому тіло вважатимемо напівобмеженим. З моменту часу, наступного за початковим, здійснюється теплообмін теплопровідністю між покриттям і основою. Тепловий контакт між ними будемо вважати ідеальним. Також має місце променевий і конвективний теплообмін з навколишнім середовищем, але він протікає з помітно меншою інтенсивністю ніж з основою, тому їм будемо нехтувати, тобто за рахунок тепловідведення від покриття в основу почнеться процес його затвердіння і охолодження твердої кірки. Об'єм рідкої фази буде скорочуватися при незмінній її температурі T_f . Теплота що надходить в тверду кірку з боку фронту затвердіння $\eta(t)$, дорівнює тепловому ефекту фазового переходу. Для подальшої чисельної реалізації вважатимемо товщину тіла скінченною і рівною $l - \delta$, де l обирається з умови відсутності проникнення тепла на відповідну глибину в основу. Теплофізичні характеристики основи і твердої фази покриття будемо вважати заданими функціями температури.

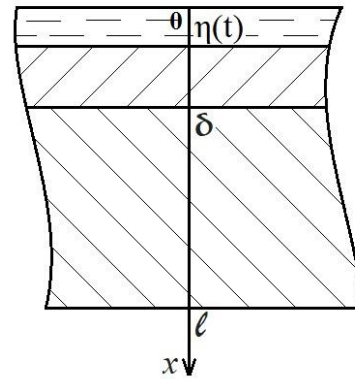


Рис. 2. Тіло з покриттям, що затвердіває на його поверхні

Fig. 2. A body with a coating that hardens on its surface

Математична модель процесу затвердіння покриття на поверхні тіла включає в себе рівняння теплопровідності для твердої кірки і основи:

$$c_1(T_1)\rho_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial x}\right), \quad (1)$$

$$\eta(t) < x < \delta, \quad 0 < t \leq t^*$$

$$c_2(T_2)\rho_2(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_2(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial x}\right), \quad (2)$$

$$\delta < x < l, \quad 0 < t < t^*$$

граничні умови:

$$T_1|_{x=\eta(t)} = T_f, \quad 0 < t < t^*, \quad (3)$$

$$\lambda_1(T_f)\frac{\partial T_1}{\partial x}\Big|_{x=\eta(t)} = \rho_1(T_f)L\frac{d\eta}{dt}, \quad 0 < t < t^*, \quad (4)$$

$$T_1|_{x=\delta} = T_2|_{x=\delta}, \quad 0 < t < t^*, \quad (5)$$

$$\lambda_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial x}\Big|_{x=\delta} = \lambda_2(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial x}\Big|_{x=\delta}, \quad 0 < t < t^*, \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial x}\Big|_{x=l} = 0, \quad 0 < t < t^*, \quad (7)$$

і початкові умови:

$$T_2|_{t=0} = T_0, \quad \delta \leq x \leq l, \quad (8)$$

$$\eta|_{t=0} = \delta, \quad (9)$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

де x – просторова координата; t – поточний час; t^* – момент закінчення процесу затвердіння, який визначається з рівняння $\eta(t^*)=0$; $T_k(x,t)$ – температурні поля; λ_k – коефіцієнти теплопровідності; c_k – теплоємності; $\kappa = 1$ – відповідає твердій кірці покриття; $\kappa = 2$ – основи; L – теплота затвердіння матеріалу покриття.

Гранична умова (4) є умовою Стефана і характеризує баланс тепла на фронті фазового переходу. Математична модель (1) – (9) є задачею Стефана, з якої визначаються температурні поля $T_k(x,t)$ і закон руху фронту затвердіння $\eta(t)$ [2].

Проміжки $0 \leq x \leq \delta$, $\delta \leq x \leq l$ розіб'ємо відповідно на N_1 і N_2 частин з кроками $h_1 = \frac{\delta}{N_1}$ і $h_2 = \frac{l-\delta}{N_2}$, тоді координати вузлів сітки в першому проміжку будемо визначати за формулою

$$x_i = h_1(N_1 + i), \quad i = \overline{-N_1, 0}, \quad (11)$$

а в другому проміжку за формулою

$$x_i = \delta + h_2 i, \quad i = \overline{0, N_2}. \quad (12)$$

Сітку за часом введемо таким чином, щоб за кожен крок по часу τ_j фронт затвердіння переміщався рівно на величину h_1 . Тоді, враховуючи, що $t_0 = 0$, $t_j = \sum_{k=1}^j \tau_k$, $j = \overline{1, N_1}$, положення фронту затвердіння у відповідні моменти часу будуть визначатися за формулою

$$\eta_j = h_1(N_1 - j), \quad j = \overline{0, N_1}. \quad (13)$$

На введеній сітці диференціальні рівняння теплопровідності (1) і (2) апроксимуємо неявними різницевиими рівняннями:

$$\begin{aligned} (c_1 \rho_1)_i^{j-1} \frac{T_i^j - T_i^{j-1}}{\tau_j} &= \\ &= \frac{1}{h_2} \left[\lambda_{1,i+\frac{1}{2}}^{j-1} (T_{i+1}^j - T_i^j) - \lambda_{1,i-\frac{1}{2}}^{j-1} (T_i^j - T_{i-1}^j) \right]; \\ i &= \overline{-j+1, -1}, \quad j = \overline{2, N_1}; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} (c_2 \rho_2)_i^{j-1} \frac{T_i^j - T_i^{j-1}}{\tau_j} &= \\ &= \frac{1}{h_2} \left[\lambda_{2,i+\frac{1}{2}}^{j-1} (T_{i+1}^j - T_i^j) - \lambda_{2,i-\frac{1}{2}}^{j-1} (T_i^j - T_{i-1}^j) \right]; \\ i &= \overline{1, N_2 - 1}, \quad j = \overline{1, N_2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Дискретні аналоги граничних і початкових умов запишуться у вигляді:

$$T_{-j}^j = T_f, \quad j = \overline{1, N_1}; \quad (16)$$

$$\lambda_1(T_f) \frac{T_f - T_{-j+1}^j}{h_1} = \rho_1(T_f) L \frac{h_1}{\tau_j}, \quad j = \overline{1, N_1}; \quad (17)$$

$$\lambda_{1,0}^{j-1} \frac{T_0^j - T_{-1}^j}{h_1} = \lambda_{2,0}^{j-1} \frac{T_1^j - T_0^j}{h_2}, \quad j = \overline{1, N_1}; \quad (18)$$

$$\frac{T_{N_2}^j - T_{N_2-1}^j}{h_2} = 0, \quad j = \overline{1, N_1}; \quad (19)$$

$$T_i^0 = T_0, \quad i = \overline{0, N_2}. \quad (20)$$

де $(c_k \rho_k)_i^{j-1} = c_k(T_i^{j-1}) \rho_k(T_i^{j-1})$;

$$\lambda_{k,i\pm\frac{1}{2}}^{j-1} = \lambda_k \left(\frac{T_{i\pm\frac{1}{2}}^{j-1} + T_i^{j-1}}{2} \right).$$

Система рівнянь (14) – (20) нелінійна відносно невідомих T_i^j , τ_j і для її розв'язання можна застосувати метод ітерацій.

Ітераційний процес закінчується при виконанні умови [2, 3]:

$$\left| \frac{\tau_j^{(s+1)} - \tau_j^{(s)}}{\tau_j^{(s+1)}} \right| \leq \varepsilon, \quad \varepsilon > 0.$$

Результати

За допомогою розробленої комп'ютерної програми були виконані розрахунки температурного поля системи основа – покриття і закону руху фронту затвердіння при наступних вихідних даних: матеріал основи – сталь 40Х з сталими теплофізичними характеристиками:

$$c_2 = 466 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad \rho_2 = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad \lambda_2 = 46 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}};$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

матеріал покриття – титан з теплофізичними ха-

рактеристиками: $c_1 = 540 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, $\rho_1 = 4150 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$,

$\lambda_1 = 22 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$, $T_f = 1943 \text{ К}$, $L = 358 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. То-

вшина покриття $\delta = 1 \text{ мм}$. При виконанні розрахунків для даної системи розглядалося два випадки. У першому випадку вважалося, що температура основи в початковий момент часу дорівнює температурі навколишнього середовища $T_0 = 300 \text{ К}$, тобто покриття наносилось на холодне тіло. У другому випадку тіло в початковий момент часу вважалося підігрітим до $T_0 = 700 \text{ К}$. Результати розрахунків наведені на рис. 3–8.

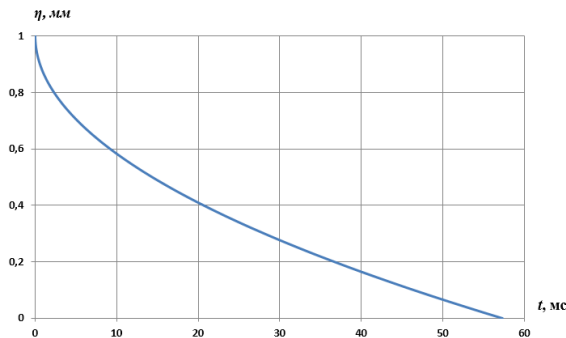


Рис. 3. Закон руху фронту затвердіння титанового покриття при $T_0 = 300 \text{ К}$

Fig. 3. The law of motion of the solidification front of a titanium coating at $T_0 = 300 \text{ К}$

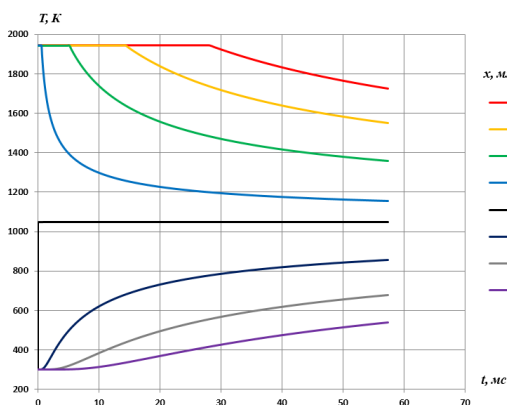


Рис. 4. Зміна температури у часі в різних точках системи сталь – титан при $T_0 = 300 \text{ К}$

Fig. 4. Temperature change over time at different points of the steel-titanium system at $T_0 = 300 \text{ К}$

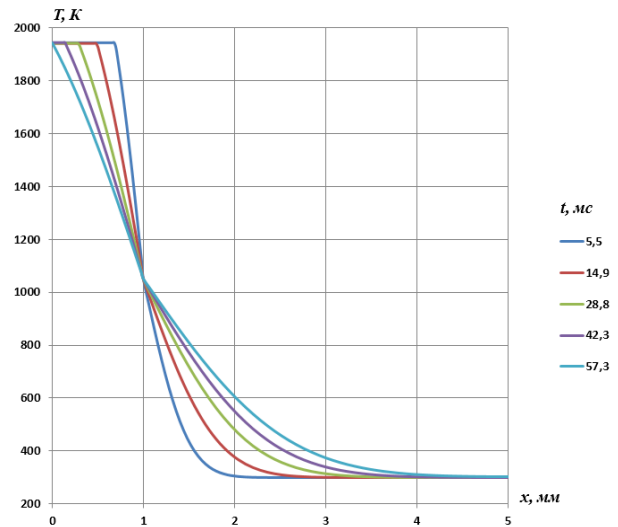


Рис. 5. Розподіл температур по товщині системи сталь – титан в різні моменти часу при $T_0 = 300 \text{ К}$

Fig. 5. Temperature distribution across the thickness of the steel-titanium system at different times when $T_0 = 300 \text{ К}$

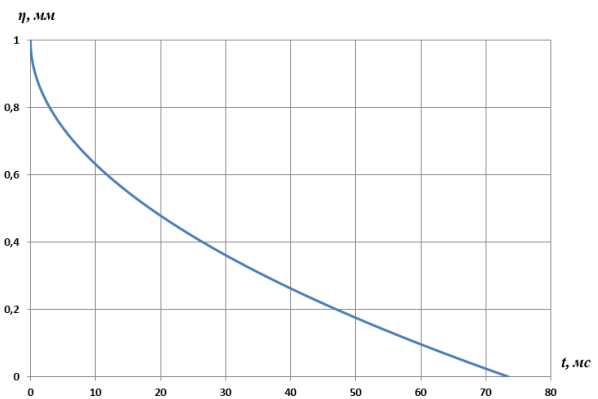


Рис. 6. Закон руху фронту затвердіння титанового покриття при $T_0 = 700 \text{ К}$

Fig. 6. The law of motion of the solidification front of a titanium coating at $T_0 = 700 \text{ К}$

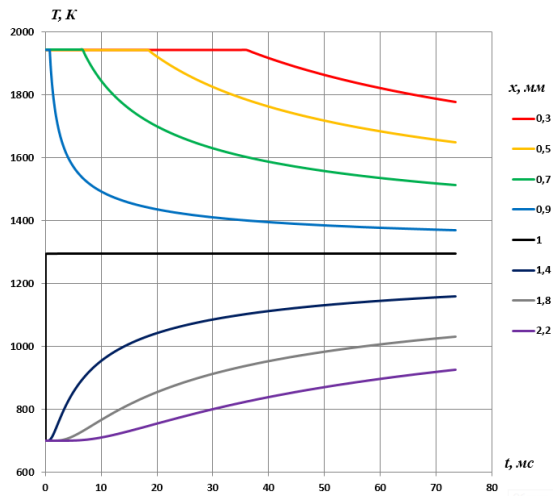


Рис. 7. Зміна температури у часі в різних точках системи сталь – титан при $T_0 = 700\text{ K}$

Fig. 7. Temperature change over time at different points of the steel-titanium system at $T_0 = 700\text{ K}$

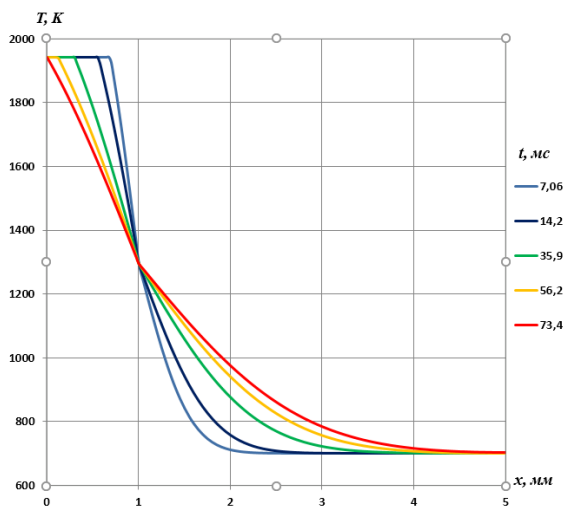


Рис. 8. Розподіл температур по товщині системи сталь -титан в різні моменти часу при $T_0 = 700\text{ K}$

Fig. 8. Temperature distribution across the thickness of the steel-titanium system at different times when $T_0 = 700\text{ K}$

З рис. 3 та 6 видно, що при $T_0 = 300\text{ K}$, час затвердіння покриття становить $t^* = 57,3\text{ ms}$, а при $T_0 = 700\text{ K}$ – $t^* = 73,4\text{ ms}$, тобто час затвердіння збільшився на 16,1 ms.

Рис. 4 та 7 ілюструють зміну в часі температури в різних точках системи основа – покриття. Температура у відповідній точці покриття

залишається постійною до приходу в неї фронту затвердіння, після чого температура для затверділого матеріалу покриття монотонно убиває. Температура в точках основи з часом монотонно зростає і буде тим більше, чим ближче точка до поверхні контакту основи з покриттям. По мірі заглиблення в основу збільшується запізнення нагріву її відповідних об'ємів. Цікавим фактом є те, що на поверхні контакту одразу встановлюється температура, яка протягом усього процесу затвердіння залишається незмінною аналогічно тому, як це має місце при приведенні в дотик двох напівобмежених тіл з різною температурою. При $T_0 = 300\text{ K}$ ця температура дорівнює 1050 K , а при $T_0 = 700\text{ K}$ – 1296 K , що близько до середнього арифметичного значення між T_f та T_0 , це пов'язано з близькістю коефіцієнтів теплопровідності сталі і титану.

З рис. 5 та 8 видно, що температура в різні моменти часу убиває вглиб системи. У твердій кірці покриття, температурні криві, асимптотично наближаються до T_0 , випуклі вгору, а в основі випуклі вниз, тобто випуклість змінюється на границі контакту основи і покриття. Температура в покритті убиває з прискоренням, а в основі з уповільненням. Всі температурні криві перетинаються в одній точці $x = 1$ і мають в ній злам, пов'язаний з різницею коефіцієнтів теплопровідності сталі і титану.

Наукова новизна та практична значимість

Побудовано нелінійну математичну модель затвердіння покриття, сформованого на поверхні тіла внаслідок плазмового напилення, з урахуванням залежності теплофізичних параметрів матеріалів від температури. Із застосуванням неявної різницевої схеми з прив'язкою рухомого фронту фазового переходу до вузлів сітки розроблено алгоритм чисельного розв'язання відповідної задачі Стефана та реалізовано його у вигляді програмного комплексу. На основі цієї моделі виконано чисельне моделювання процесів затвердіння титанових і алюмінієвих покриттів на сталевій підкладці з початковою температурою, що відповідала температурі докілья або становила 700 K , для випадків сталих і температурно-змінних тепло-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

фізичних властивостей матеріалів, а також здійснено їх порівняльний аналіз.

Результати роботи можуть бути використані при дослідженні затвердіння покриття напиленого на поверхню тіла, а також при виборі режимних параметрів процесу плазмового напилення.

Висновки

1. Розглянуто технологічний процес відновлення деталей плазмовим напиленням.

2. Побудовано нелінійну математичну модель затвердіння покриття, що нанесене на поверхню тіла плазмовим напиленням, з урахуванням температурної залежності теплофізичних характеристик матеріалів.

3. На основі неявного різницевого методу з ловлею фронту у вузол сітки, розроблено алгоритм розв'язання задачі про затвердіння металевого покриття на поверхні тіла, а також створено його програмну реалізацію.

4. На основі вихідної математичної моделі здійснені розрахунки процесів затвердіння титанового та алюмінієвого покриттів на сталевій основі, що мала початкову температуру, рівну температурі навколишнього середовища або була підігріта до 700 К, при змінних і сталих теплофізичних властивостях матеріалів, а також здійснено детальний аналіз та порівняння їх результатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гасій О. Б., Ацбергер Й. Л. До питання підвищення стійкості метало- і дереворізного інструменту йонно-плазмовим напиленням. *Науковий вісник УкрДЛТУ*. 2001. Вип. 11.4. С. 135–139.
2. Самборська О. М., Шелестовський Б. Г. *Чисельні методи* : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2010. 164 с. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/20814>
3. *Чисельні методи* : посібник / уклад.: І. В. Мірошкіна, О. А. Палагіна ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси : ЧДТУ, 2017. 116 с.
4. Ярослав Ю. О., Карпеченко А. А., Бобров М. М., Кондратьєва А. А., Лабарткава О. В., Савочкіна В. В. Нанесення плазмових алюмоматричних композиційних покриттів. *Збірник наукових праць НУК*. 2025. № 2(500). С. 66–72. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).10](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).10)
5. Fizi Y., Mebdoula Y., Lahmar H., Djieraf S., Benbahouche S. Adhesion of FeCrNiBSi-(W-Ti)C wire-arc deposited coatings onto carbon steel substrates determined by indentation measurements and modelling. *Surface and Coating Technology*. 2015. Vol. 268. P. 310–316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.004>
6. Kopylov V. Effect of multiphase structure of plasma coatings on their elastic and strength properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5, No. 5(83). P. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79586>
7. Liu M., Peng Q., Huang Y. Influencing Factors and Process Optimization of Al/SiC Powder-cored Wires by Plasma Transferred Wire Arc Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2024. Vol. 33. P. 2167–2183. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01823-2>
8. Rahman M., Profili J., Stafford L., Moreau C. Surface preparation of aluminium by atmospheric-pressure plasma jet for suspension plasma sprayed ceramic coatings. *Surface and Coating Technology*. 2024. Vol. 476. P. 130–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130175>
9. Wang Y., Sun C., Sun J., Zhao W., Dong L., Li L., Meng F. Erosion behaviour of arc sprayed FeTi/CrB MMC coating at elevated temperature. *Surface and Coating Technology*. 2015. Vol. 262. P. 141–147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.027>
10. Zhao L., Zhou D., Xie G., Peng Y., Ciu X., Wang J., Xiong T. Unraveling the influence of Al particle size on microstructure and tribological properties of cold sprayed Al/B4C composite coatings. *Materialstoday Communications*. 2023. Vol. 34. 105257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105257>

V. V. BILIAIEVA^{1*}, O. I. GUBIN², IU. V. BRAZALUK³

^{1*}Dep. «Energy Systems and Energy Management», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI USUCT, Nauky Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 101 19 78, e-mail vikabelyeva604@gmail.com, ORCID 0000-0001-9987-6384

²Dep. of Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer, Oles Honchar Dnipro National University, Nauky Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (099) 319 47 91, e-mail hubin_o@365.dnu.edu.ua, ORCID 0000-0001-9434-2367

³Dep. of Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer, Oles Honchar Dnipro National University, Nauky Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (050) 582 71 71, e-mail brazaluk_jv@ukr.net, ORCID 0000-0001-6448-8525.

Numerical Study of the Solidification Process of a Thin Coating on a Body Surface

Purpose. Plasma spraying is widely used to strengthen and restore the working surfaces of product parts, which is due to the combination of its technical and economic advantages and high process efficiency. The active use of this technology, in particular when processing a wide range of parts, imposes increased requirements on the level of equipment used and the quality of raw materials. At the same time, the plasma spraying method of coatings has a number of limitations, which at the same time serve as a potential reserve for further improvement of technological solutions. An effective method for solving such problems is the use of mathematical models. The main goal of the work consists in building a nonlinear mathematical model of coating hardening on the surface of the body, taking into account the temperature dependence of thermophysical characteristics. **Methodology.** The mathematical model for studying the process of coating solidification on the body surface includes heat conduction equations for the solid crust and the base. Numerical integration of the modeling equations is carried out using the implicit difference method with front trapping at the grid node. **Findings.** A computer program has been developed that allows for numerical studies of the solidification processes of titanium and aluminum coatings on a steel base. The results of numerical modeling are presented. **Originality.** A nonlinear mathematical model has been developed to study the process of solidification of a thin coating on the surface of a body. The model is based on the numerical integration of heat conduction equations for the solid crust and the base and allows determining the change in temperature over time at different points of the «base – coating» system. **Practical value.** The developed mathematical model can be useful in studying the hardening of a coating sprayed onto a body surface, as well as in selecting the operating parameters of the plasma spraying process. It provides a scientific justification for the process parameters and operating modes of the equipment used. The model allows us to evaluate the dynamics of the formation of thermal fields in the hardening process of coatings.

Key words: plasma spraying; coating hardening; temperature field; phase transition front; mathematical model

REFERENCES

- Hasiy, O. B., & Acberher, Y. L. (2001). To question of rising of metal- and wood-cutting instrument resistance by ion-plasma evaporation. *Naukovyy visnyk UkrDLTU*, 11.4, 135-139. (in Ukrainian)
- Samborska, O. M., & Shelestovskyi, B. H. (2010). *Chyselni metody*. Ternopil, Ukraine: TNTU imeni Ivana Puliuiia. Retrieved from <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/20814> (in Ukrainian)
- Miroshkina, I. V., & Palahina, O. A. (Comp). (2017). *Chyselni metody*. Cherkasy, Ukraine: ChDTU (in Ukrainian)
- Yaros, Y. O., Karpechenko, A. A., Bobrov, M. M., Kondratieva, A. A., Labartkava, A. V., & Savochkina, V. V. (2025). Deposition of plasma aluminum matrix composite coatings. *Collection of Scientific Publications NUS*, 2(500), 66-72. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).10](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).10) (in Ukrainian)
- Fizi, Y., Mebdoula, Y., Lahmar, H., Djieraf, S., & Benbahouche, S. (2015). Adhesion of FeCrNiBSi-(W-Ti)C wire-arc deposited coatings onto carbon steel substrates determined by indentation measurements and modelling. *Surface and Coating Technology*, 268, 310-316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.004>
- Kopylov, V. (2016). Effect of multiphase structure of plasma coatings on their elastic and strength properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(5(83)), 49-57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79586>
- Liu, M., Peng, Q., & Huang, Y. (2024). Influencing Factors and Process Optimization of Al/SiC Powder-cored Wires by Plasma Transferred Wire Arc Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 33, 2167-2183. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01823-2>

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

8. Rahman, M., Profili, J., Stafford, L., & Moreau, C. (2024). Surface preparation of aluminium by atmospheric-pressure plasma jet for suspension plasma sprayed ceramic coatings. *Surface and Coating Technology*, 476, 130-175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130175>
9. Wang, Y., Sun, C., Sun, J., Zhao, W., Dong, L., Li L., & Meng, F. (2015). Erosion behaviour of arc sprayed FeTi/CrB MMC coating at elevated temperature. *Surface and Coating Technology*, 262, 141-147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.027>
10. Zhao, L., Zhou, D., Xie, G., Peng, Y., Ciu, X., Wang, J., & Xiong, T. (2023). Unraveling the influence of Al particle size on microstructure and tribological properties of cold sprayed Al/B₄C composite coatings. *Materialstoday Communications*, 34, 105257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105257>

Надійшла до редколегії: 08.11.2025

Рекомендовано до публікації: 16.12.2025

Дата публікації: 27.03.2026