

УДК 621.375.826:621

Головко Л.Ф. д.т.н. проф., Блощин М.С. ас., Третяк В.А. асп.
НТУУ «Київський політехнічний інститут» м. Київ, Україна

ФОРМУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОВЕРХОНЬ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

Golovko L., Bloschycyn M., Tretyak V.

The National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine (misha_fox@mail.ru)

FORMATION OF WEAR-RESISTANT SURFACES BY LASER-PLASMA SURFACING

Розглядається комбінований процес лазерно-плазмового наплавлення, коли енергія плазми використовується виключно на транспортування та підігрівання порошку до температури 0,8-0,9Тпл, лазерний промінь розплавляє певний об'єм матеріалу основи і доводить до температури плавлення підігрітій плазмою порошок. Процес дозволяє збільшувати продуктивність наплавлення без адекватного підвищення собівартості.

Комп'ютерне моделювання з використанням адаптивних методів дозволяє одержувати інформацію про температурні поля і оптимальні параметри лазерного випромінювання, параметри плазмового джерела, режими обробки, що зменшує кількість експериментів і витрати матеріальних ресурсів.

Ключові слова: моделювання, лазер, плазма, наплавлення, покриття

Вступ

Значна частка відмов машин, що працюють в умовах дії абразивних і агресивних середовищ, високих температур та тисків, безпосередньо пов'язана зі зношуванням контактуючих поверхонь деталей, втратою геометричних форм і розмірів. До таких деталей можна віднести лопатки газових турбін, що працюють при температурах 900-1000⁰С, дії агресивного газового потоку й абразивних часток, під'ятники турбокомпресорів, цапфи бурових доліт, колінчасті й розподільні вали двигунів й ін.

Надзвичайно ефективними способами ремонту спрацьованих деталей для продовження тривалості їх експлуатації є технології відновлення. Цілеспрямована зміна фізико-механічних властивостей поверхневих шарів деталей машин, відновлення їх розмірів і форми є областю ефективного застосування лазерного газопорошкового наплавлення. Основними перевагами даного процесу є універсальність, можливість ощадливого і раціонального використання дорогих і дефіцитних матеріалів, ресурсо - і енергозбереження, мінімальний вклад енергії в основу деталі, на яку проводиться наплавлення, екологічна чистота, можливість повної автоматизації. Навіть перераховані ознаки ставлять дану технологію в ряд тих, що відповідають найсучаснішим вимогам розвитку промислового виробництва [1, 2, 3].

Однак висока вартість енергії лазерного випромінювання та істотне збільшення собівартості наплавлення при збільшенні продуктивності процесу обмежує область використання цієї технології. У зв'язку з цим розвиток отримали наукові дослідження, спрямовані на пошук способів зниження собівартості процесу лазерного газопорошкового наплавлення за рахунок використання більш дешевих допоміжних джерел енергії. Результатом цих досліджень став процес лазерно-плазмового наплавлення, коли функції кожного джерела енергії чітко розмежовані [4]. Енергія плазми використовується виключно на підготовчий стадії процесу – транспортуванні та підігріванні порошку до температури 0,8-0,9Тпл. Лазерний промінь розплавляє певний об'єм матеріалу основи і доводить до температури плавлення підігрітій плазмою порошок. Наведена технологія є привабливою оскільки дозволяє істотно і за малий проміжок часу збільшувати продуктивність наплавлення без адекватного підвищення собівартості процесу. Все це свідчить про безумовну актуальність обраного напрямку досліджень.

Висока швидкість протікання процесів ускладнює проведення експериментальних досліджень і обумовлює необхідність застосування методів математичного моделювання.

Математичною моделлю розподілу температур в процесі лазерно-плазмового наплавлення (ЛПН) є диференційне рівняння в частинних похідних. Для його розв'язання використовують чисельні методи. Висока локальність і швидкість процесу обумовлюють необхідність вдосконалення адаптивних методів[2].

Метою роботи є застосування математичного моделювання комбінованого процесу лазерно-плазмового наплавлення з розділеними функціями джерел енергії для його параметричного аналізу, вивчення закономірностей розподілу температур, встановлення оптимальних параметрів лазерного і плазмового джерел енергії й технологічних схем та режимів обробки.

Розглядається процес, під час якого на двошарове середовище діє два рухомих джерела енергії - лазерний промінь і плазмовий струмінь (рис 1). Верхній шар являє собою композит і складається не з суцільного сплаву, а містить в собі дисперсні включення іншого матеріалу. При чому в технологічному процесі лазерно-плазмового наплавлення композитний матеріал за допомогою плазми попередньо розігрівається і подається в зону плавлення.

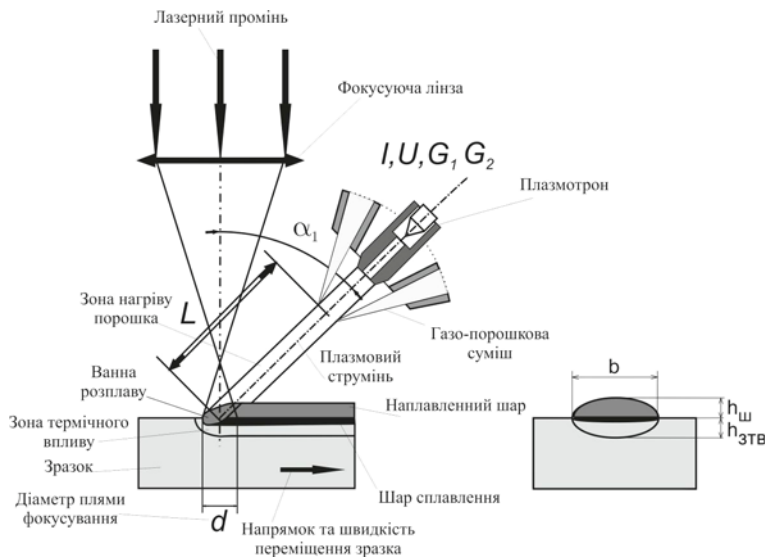


Рис. 1. Схема процесу лазерно-плазмового газопорошкового наплавлення

При моделюванні можливі різні вихідні відносні положення лазерного променя й плазмотрону: промінь лазера знаходиться перед плазмовим струменем і підплавляє матеріал основи, або коли обидва теплові джерела співпадають [4].

Для моделювання було обрано схему процесу лазерно-плазмового газопорошкового наплавлення, представлена на рис. 1. У відповідності до цієї схеми лазерний промінь з потужністю P , фокусується у круглу пляму діаметром d_n на поверхні оброблюваного виробу, що рухається зі швидкістю V . Параметри обробки забезпечують підплавлення поверхні матеріалу основи.

Порошкова композиція подається у плазмовий струмінь потоком транспортуючого газу з витратою G_1 , за час проходження відстані L ,

підігрівається до температури $(0,8-0,9)T_{пл}$. При цьому введення порошку в розплавлений матеріал основи здійснювалось під певним кутом α .

При надходженні у ванну розплаву підігрітого порошку в останній відбувається виникнення відповідних конвективних потоків розплавленого металу, вирівнювання температур по нагрітому об'ємі, кристалізація і його охолодження. В результаті такої взаємодії всіх джерел енергії на поверхні матеріалу основи утворюється шар наплавленого матеріалу визначеної форми і розмірів (висотою h і шириною b).

Під наплавленим металом на границі із основою розташовується проміжний шар, де відбулося взаємне перемішування наплавленого матеріалу і матеріалу основи, товщиною $h_{сн}$ і зона термічного впливу, товщиною $h_{зтв}$.

Для математичного моделювання необхідно ввести теплофізичні та геометричні параметри матеріалів, що використовуються при лазерно-плазмовому наплавленні, характеристики лазерного променя та плазмового струменя (потужність, початкова швидкість, радіус джерела), тривалість процесу, параметри чисельного розрахунку (мінімальні та максимальні значення кроків, допустима похибка), межі в яких має знаходитись температура в зоні наплавлення.

Кінцевим результатом моделювання має бути розподіл температур в кожний момент часу процесу, графік оптимального розподілу швидкості системи «плазмотрон – лазерний промінь».

Для зручності розрахунку вважаємо, що рухається система «лазерний промінь-плазмотрон», зразок, на який наплавляється композитний матеріал, нерухомий.

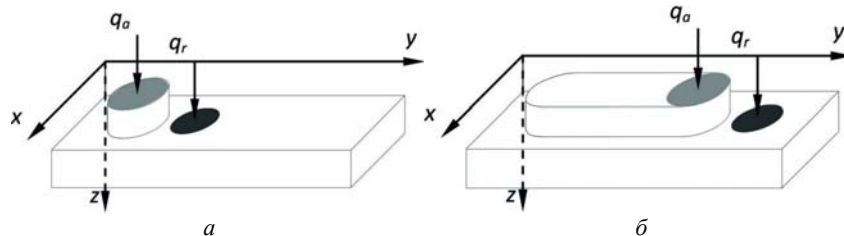


Рис. 2. Розрахункова область для двох моментів часу: початковий (а) та кінцевий (б)

наплавлений шар має форму кругового циліндра (рис. 2 а). В подальшому цей циліндр рухається синхронно з плазмотроном, залишаючи по собі наплавлений шар порошкового матеріалу (рис. 2 б).

Матеріал наплавленого шару має композитну структуру: сталева матриця основи та включення іншого матеріалу (наприклад, бронзи чи іншого різновиду сталі). Розміри всієї розрахункової області позначимо через

L_x, L_y, L_z , висоту покриття — через h . Плазмовий струмінь плазмотрона і промінь лазера рухаються синхронно зі швидкістю V . Потужності плазмового струменя та лазерного променя в перерізі розподілені відповідно функції Гауса і викликають теплові потоки з густиною $q_r(x,y,t)$ та $q_d(x,y,t)$ відповідно. Температура оточуючого середовища позначається через U_c .

Слід зауважити, що, для спрощення розрахунків, в моделі не враховується вплив на процеси тепло- та масоперенесення руху розплавленого металу. Тобто розподіл температури обчислюється для випадку нерухомого рідкого металу. Також не враховується деформація вільної поверхні розплавленого металу.

Необхідно знайти розподіл температури для заданої розрахункової області, що обумовлюється рухомим лазерним променем і плазмовим струменем, провести оптимізацію розподілу швидкостей системи «лазерний промінь - плазмовий струмінь» для отримання заданої температури на межі наплавленого шару з матеріалом основи.

Математична модель. Розподіл температури $U(x,y,z,t)$ в робочій області описується тривимірним нелінійним нестационарним рівнянням теплопровідності:

$$c\rho \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial U}{\partial z} \right), \quad (1)$$

де $c(z,U)$ - питома теплоємність матеріалу, що враховує наявність фазових переходів і композитну структуру наплавленого шару, $\rho(z,U)$ - густина, $\lambda(z,U)$ - коефіцієнт теплопровідності. Залежність теплофізичних коефіцієнтів від координати Z обумовлена наявністю основи і двофазового наплавленого шару на її поверхні.

Гранична умова на поверхні обробки в зоні дії лазерного променя має вигляд:

$$\lambda \frac{\partial U(x,y,0,t)}{\partial z} + q(x,y,t) = 0. \quad (2)$$

Гранична умова на поверхні обробки поза зоною дії лазерного випромінювання й граничні умови на інших гранях розрахункової області моделюють теплообмін із середовищем за законом Ньютона:

$$\lambda \frac{\partial U}{\partial n} = -\alpha(U - U_c). \quad (3)$$

Початкова температура деталі дорівнює температурі навколишнього середовища:

$$U(x,y,z,0) = U_c. \quad (4)$$

Матеріал наплавленого шару являє собою двофазне середовище. Його можна вважати зернистим композитним матеріалом з регулярною структурою, основу якої становить елементарна ланка у вигляді куба (рис.3) [3]. Ланка складається з матриці, матеріал якої характеризується параметрами ρ_m, c_m, λ_m (густиною, коефіцієнтами теплоємності й теплопровідності), і включення сферичної форми з параметрами ρ_f, c_f, λ_f .

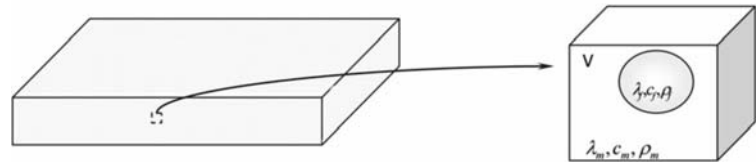


Рис. 3. Елементарна кубічна ланка матеріалу наплавленого шару з дисперсними включеннями у вигляді інших часток

Завдання розрахунку розподілу температури в композиті формулюються щодо температури, усередненої по об'єму елементарної ланки $\langle T \rangle = \frac{1}{V} \int U dV$, що залежить від ефективних (макроскопічних) характеристик композита $\rho_{eff}, c_{eff}, \lambda_{eff}$.

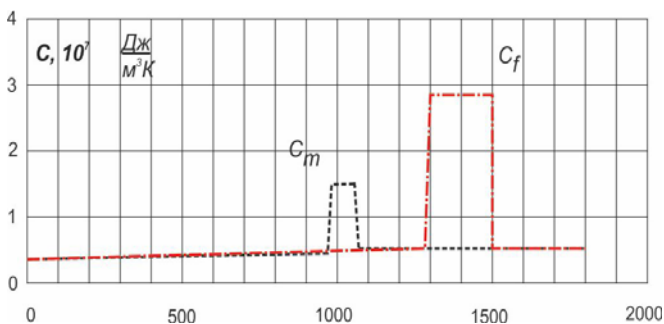


Рис. 4. Залежність ефективної теплоємності матеріалу

Ефективне значення теплопровідності наплавленого шару за умови, що включення сферичні й мають малу об'ємну концентрацію $V_f < 0.3$, можна обчислити за формулою [5]:

$$\lambda_{eff} = \lambda_m \frac{1 + 2V_f \left(1 - \frac{\lambda_m}{\lambda_f}\right) / \left(1 + 2\frac{\lambda_m}{\lambda_f}\right)}{1 - V_f \left(1 - \frac{\lambda_m}{\lambda_f}\right) / \left(1 + 2\frac{\lambda_m}{\lambda_f}\right)} = const \quad (5)$$

Ефективне значення об'ємної теплоємності наплавленого шару в припущенні, що розподіл температури в обсязі елементарної ланки близький

до однорідного, можна обчислити за формулою:

$$C_{eff} = (cp)_{eff} = \dot{C}_m(1-V_f) + \dot{C}_f V_f \quad (6)$$

де \dot{C}_m, \dot{C}_f - значення об'ємної теплоємності матеріалів матриці й включення, які враховують сховану теплоту плавлення (кристалізації) (рис.4).

Якщо величини \dot{C}_m й \dot{C}_f апроксимувати кусково-лінійними функціями від U:

$\dot{C}_m = a_m u + b_m$, $\dot{C}_f = a_f u + b_f$, то й ефективне значення об'ємної теплоємності буде кусково-лінійною функцією:

$$C_{eff} = (cp)_{eff} = (a_m u + b_m)(1-V_f) + (a_f u + b_f)V_f = au + b, \quad (7)$$

де $a = \kappa_m - \kappa_m V_f + \kappa_f V_f$, $b = b_m - b_m V_f + b_f V_f$

Моделюється процес лазерно-плазмового наплавлення порошку бронзи ОЦС 3-8-6 на сталь 9Х12.

На першому етапі вводяться розміри предметної області, відповідно з чим змінюється зображення деталі, та товщина плазмового покриття ($L_x = 1\tilde{n}\tilde{i}$, $L_y = 1\tilde{n}\tilde{i}$, $L_z = 2\tilde{n}\tilde{i}$, $h = 0,1\tilde{n}\tilde{i}$), параметри лазерного променя і плазмового струменя (радіус, потужність, швидкість переміщення, координати положення - x,y, відстань між плазмовим струменем і лазерним променем).

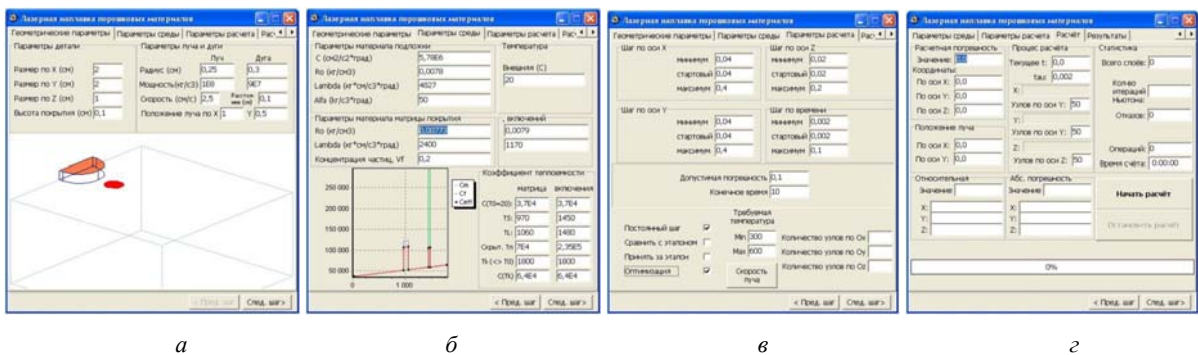


Рис. 5. Приклад змісту інформації, яка вводиться на 1-4 етапах підготовчого процесу розрахунків

Потім задаються теплофізичні параметри покриття і матриці (коефіцієнти теплоємність, густина, теплопровідність, температуропровідність), концентрація включень, початкові параметри середовища, в котрому буде відбуватись експеримент. Для наочності, оскільки коефіцієнт теплоємності апроксимується кусково-лінійною функцією, зображення графіку функцій коефіцієнту теплоємності представлено на рис. 5. Всі розрахунки проводяться в системі одиниць кг, см, с.

На наступному етапі для виконання чисельних розрахунків вводяться значення обмежуючих параметрів, наприклад, величини максимально припустимої похибки, граничні значення кроків по вісям x, y, z і в часі, значення мінімальної і максимальної температури, тобто межі оптимальних температур, загальний час перебування процесу наплавлення. Введені дані заносяться в «блок збереження загальних налаштувань та параметрів», де відбувається їхня перевірка на цілісність та коректність.

Завершальний етап підготовчої стадії відображає безпосередньо процес розрахунку, керування його початком і екстремним припиненням, можливість переривання розрахунку, змінювання параметрів експерименту і його продовження. Головна функція цього етапу це зв'язок з блоком розрахунків, де і вирішується головне завдання – чисельне моделювання теплового поля, що виникає під час дії на двошарове середовище рухомого джерела енергії.

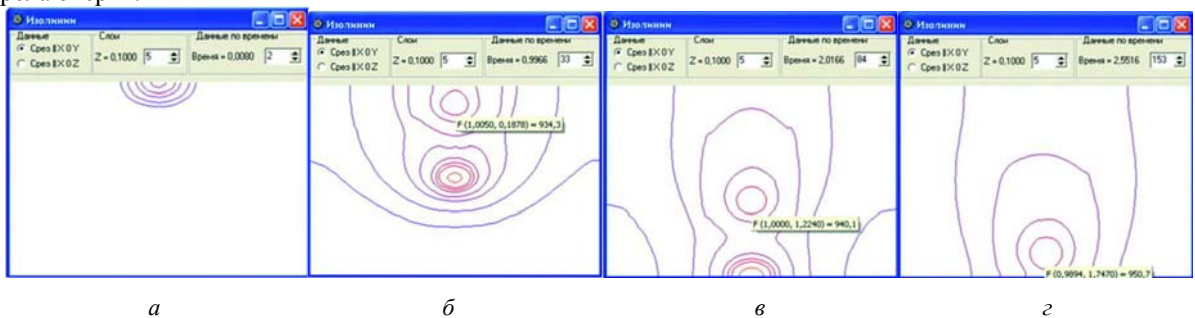


Рис. 6. Ізолії температури на межі середовищ для чотирьох моментів часу: а) $t_1=0,008$; б) $t_2=0,997$; в) $t_3=2,017$; г) $t_4=2,55$

Після завершення підготовчого процесу, здійснюється чисельне моделювання і представлення його результатів та статистичні дані, які формуються впродовж всього розрахунку і містять інформацію про кожен крок чисельного моделювання.

Моделювання проводилось для таких матеріалів:

- матриця покриття – сталь-9Х12;
- дисперсні включення покриття – бронза ОЦР 3-8-6;
- підложка – сталь-3.

Геометричні параметри об'єкта становили: $L_x = 1\text{см}$, $L_y = 1\text{см}$, $L_z = 2\text{см}$, $h = 0,1\text{см}$

При значеннях параметрів випромінювання та навколишнього середовища: коефіцієнт взаємодії з середовищем, $\alpha = 50 \frac{\text{вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}} = 50 \frac{\text{кВт}}{\text{сек}^3 \cdot \text{град}}$; максимальна густина розподілу теплового потоку лазерного

променя та плазмового струменя, відповідно $q^n_{\text{max}} = 1\text{E}8 \frac{\text{кВт}}{\text{сек}^3}$, $q^d_{\text{max}} = 9\text{E}7 \frac{\text{кВт}}{\text{сек}^3}$; радіуси лазерного

променя та плазмового струменя, $r^n = 0,25\text{см}$, $r^d = 0,3\text{см}$; відстань між границею зони нагріву лазерним променем та плазмового струменя, $d = 0,1\text{см}$; швидкість системи лазерний промінь-плазмовий струмінь,

$v = 1 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$; температура навколишнього середовища $U_c = 20^\circ \text{C}$.

На рис. 6 представлені ізолінії результуючої функції температури для чотирьох моментів часу. В центрі зони дії плазмового струменя спостерігається найбільша температура відносно межі двох середовищ покриття та підкладки, котра становить приблизно 940°C . Ще один пік температури належить зоні дії лазерного променя. Проте оскільки лазер розташований перед дугою, а шар напилення з'являється в деякій області після проходження дуги, цей пік знаходиться не на межі середовищ, а на поверхні деталі, де наплавлення ще не відбувається. На рис. 7 представлені тривимірні розподіли температури на межі середовищ, для тих же самих моментів часу, що в попередньому випадку.

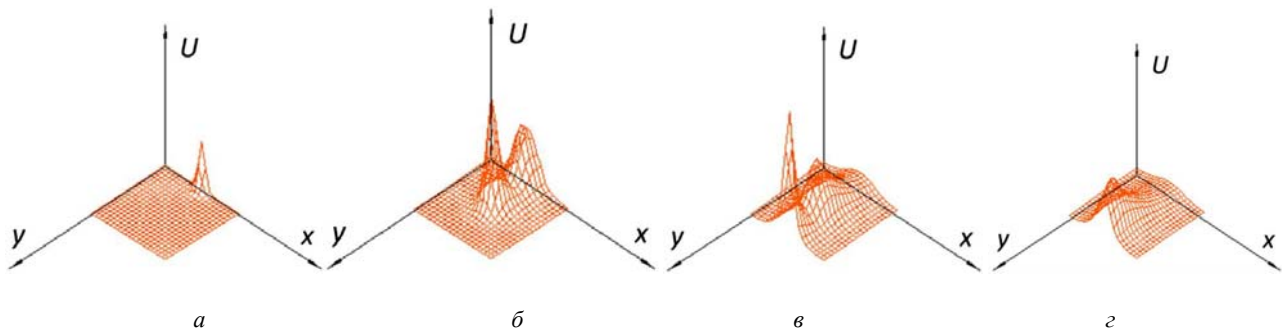


Рис. 7. Тривимірні графіки температури на межі середовищ для моментів часу:
а) $t_1=0,008$; б) $t_2=0,997$; в) $t_3=2,017$; з) $t_4=2,55$

Для здійснення оптимізації область в напрямку осі Оу розбивається на ділянки та визначається кусково-постійна функція зміни швидкості, як це показано на рис. 8а.

Потім визначається бажаний діапазон температур: в прикладі задано - $T_{\text{min}} = 600$, $T_{\text{max}} = 900$. Після подвійної ітерації було отримано розподіл швидкостей, представлений на рис. 8б. На рис. 9 показано, як змінюється цільова функція, тобто максимальні значення температур, що спостерігались на межі двох середовищ впродовж перебігу процесу наплавлення. Верхня крива показує цільову функцію при початкових значеннях швидкостей, нижня – при оптимальних.

З рисунку добре видно, що початкові значення цільової функції далекі від бажаних. Значення цільової функції, при отриманих в результаті проходу циклу оптимізації швидкостях, значно краще задовольняють умовам оптимізації. Хоча одержані остаточні значення цільової функції не є ідеальними, можна зробити висновок, що на останньому проміжку часу доречно зменшити швидкість переміщення.

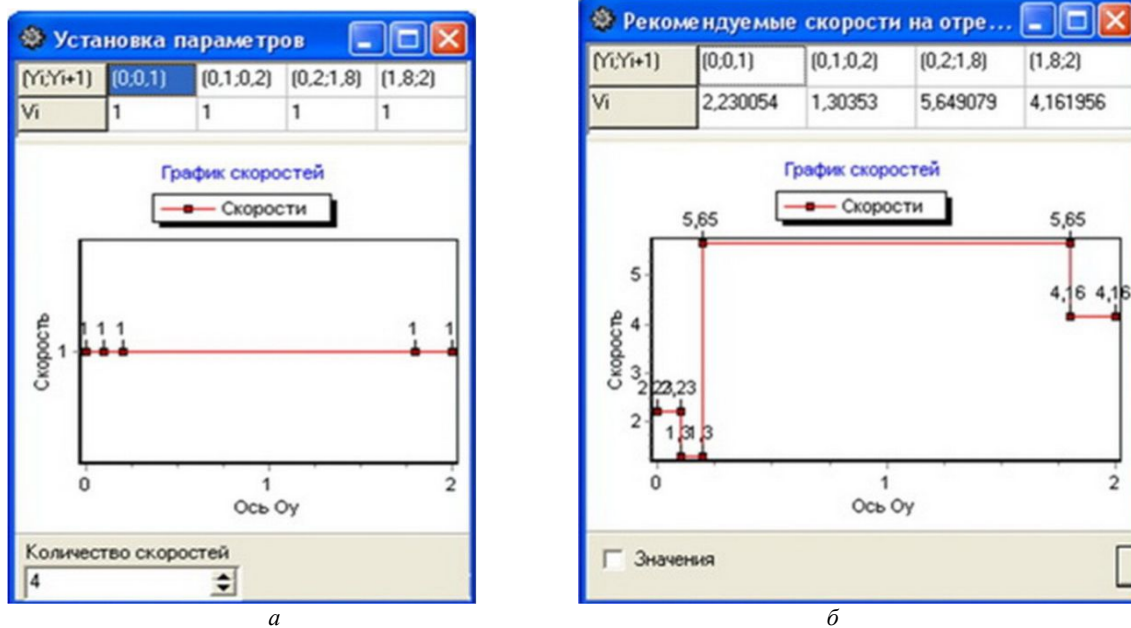


Рис. 8. Графіки розподілу швидкостей: а) початковий розподіл; б) оптимальний розподіл

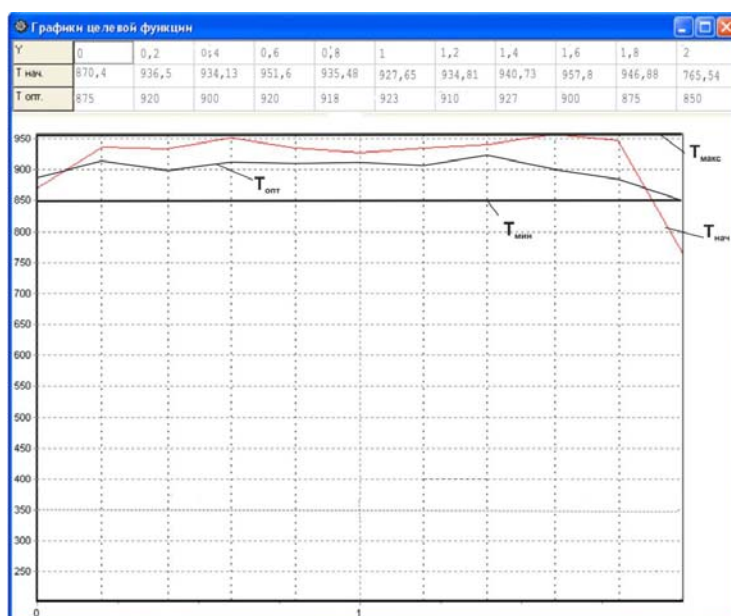


Рис.9. Графіки цільової функції зміни швидкості переміщення зразка

Висновки

Моделювання високо градієнтних температурних полів значно прискорюється при використанні адаптивних методів розв'язку крайових задач.

Запропоновано та проілюстровано оптимізацію процесу лазерно-плазмового наплавлення за швидкістю пересування системи «лазерний промінь-плазмовий струмінь». Для цього запропоновано застосувати послідовно градієнтний метод та метод оцінювання з використанням квадратичної апроксимації.

Розроблено програмне забезпечення, призначене як для розробників технологічних процесів комбінованого лазерно-плазмового наплавлення, так і для спеціалістів з чисельного моделювання. Програмний комплекс є зручним у використанні і надає багато можливостей для знаходження шуканих результатів та їх аналізу.

Недоліком застосованого алгоритму побудови сітки є те, що внаслідок її структурованості вузли ущільнюються не тільки в зонах високих градієнтів, але й поза ними.

Аннотация. Предложено и проанализировано несколько способов лазерно-плазменной наплавки рабочих элементов деталей машин и инструментов. Показано, что использование компьютерного программного обеспечения при математическом моделировании позволяет уменьшить количество экспериментов, при этом снизить затраты материальных ресурсов. Математическое моделирование позволяет определить условия получения оптимального результата лазерно-плазменной газопорошковой наплавки. Приведены результаты моделирования реальных режимов лазерно-плазменной газопорошковой наплавки.

Ключевые слова: моделирование, лазер, плазма, наплавка, покрытия

Abstract.

Purpose. The use of mathematical modeling of the combined laser-plasma surfacing process with separate functions of energy sources for its parametric analysis, study of patterns of temperature distribution, establishing of optimum processing parameters.

Design/methodology/approach. The high cost of laser radiation energy and increase costs during increasing productivity of surfacing process restricts the use of this technology. The actual cost reduction is the process of laser gas power surfacing by means of the use of cheaper auxiliary power sources. The result of these research has become the process of laser-plasma surfacing when functions of each energy source are clearly differentiated. Energy of plasma is used exclusively for a preparatory stage of the process: transportation and heating of powder to the temperature of 0,8-0,9Tm. The laser beam melts a certain amount of material basis and leads to the melting point of heated plasma powder. The high speed of flow processes complicates the experimental investigation and requires the use of mathematical modeling.

Methods of computer modeling lets receive information on the temperature of the field during laser-plasma surfacing by using differential equations in partial derivatives. For account of use of adaptive methods for solving equations it is possible to search for optimal parameters of laser radiation also parameters of plasma sources and modes of processing.

Findings. There has been designed software for developers of combined laser-plasma surfacing processes, and for specialists in numerical modeling.

Originality / value. The result of the research is the process of laser-plasma surfacing clear demarcation of functions for each energy source that allows increasing productivity of surfacing without any adequate increase the cost of the process.

Keywords: modelling, laser, plasma, surfacing, surfaces.

1. Коваленко В. С. Комбіновані лазерно-дугові процеси обробки матеріалів. Ч. 1. Ефекти комбінованої обробки і способи її реалізації / Коваленко В. С., Кривцун І. В. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2001. - № 5. - С. 33-44.
2. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання / [Блощинин М.С., Головка Л.Ф., С.О. Лук'яненко та ін.]; під редакцією Л.Ф. Головка та С.О. Лук'яненко. – Київ: Вістка, 2009. – 296с.
3. Исследование тепловых процессов и структуры поверхностного слоя при лазерной наплавке порошковых материалов. / [Перелом В.А., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Лихошва В.П., Шатрава А.П., Скрипка Н.Н.] – Киев : Институт электродинамики НАН Украины, 1998. – 47 с.
4. Блощинин М.С. Интенсифікація процесу лазерної обробки використанням енергії електричної дуги / Блощинин М.С., Головка Л.Ф. // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт» - Машиностроение Київ: НТУУ «КПІ», 2005, - №47, с.39-42.
5. Shen L.C. Conductivity and constant of periodic porous media / Shen L.C., Liu C. // J.Appl. Phys.-1990.- Vol.67, N 11. - P.- 7071-7081.

REFERENCES

1. Kovalenko V. S., Krivcun I. V. Kombinovani lazerno-dugovi procesy obrobky materialiv. Ch. 1. Efekty kombinovanoi' obrobky i sposoby ii' realizacii'. Naukovi visti NTUU «KPI» [Research bulletin of the national technical university of Ukraine “Kyiv politechnic institute”]. Kyiv: NTUU «KPI» VPI VPK "Politehnika". 2001, no 5. pp. 33-44.
2. Lazerni tehnologii' ta komp'juterne modeljuvannja [Laser technology and computer modeling]. [Bloschycyn M.S., Golovko L.F., S.O. Luk'janenko ta in.]; pid redakcijeju L.F. Golovka ta S.O. Luk'janenko. Kyiv: Vistka, 2009, 296p.
3. Issledovanie teplovyh processov i struktury poverhnostnogo sloja pri lazernoj naplavke poroshkovykh matirialov. [Pereloma V.A., Werba A.A., Podol'cev A.D., Kucherjavaja I.N., Lihoshva V.P., Shatrava A.P., Skripka N.N.]. Kiev: Institut jelektrodinamiki NAN Ukrainy, 1998, 47 p.
4. Bloschycyn M.S., Golovko L.F. Journal of Mechanical engineering of the National Technical University of Ukraine “Kyiv politechnic institute” Kyiv: NTUU «KPI» VPI VPK "Politehnika", 2005, no 47, pp.39-42.
5. Shen L.C., Liu C. Conductivity and constant of periodic porous media J.Appl. Phys. 1990. Vol.67, no. 11. PP. 7071-7081.