

**РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ,
ОПЛАВЛЕНИХ ЛАЗЕРНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ М. КИЇВ****Артемій Бернацький**

кандидат технічних наук, старший дослідник,

завідувач відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання»

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, вул. Казимира Малевича, буд. 11, м. Київ, 03150, Україна, bernatskyi@paton.kiev.ua

ORCID: 0000-0002-8050-5580

Микола Соколовський

інженер-технолог I категорії відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання»

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, вул. Казимира Малевича, буд. 11, м. Київ, 03150, Україна, m_sokolovskyi@paton.kiev.ua

ORCID: 0000-0003-3243-5060

Володимир Лукашенко

кандидат технічних наук,

науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання»

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, вул. Казимира Малевича, буд. 11, м. Київ, 03150, Україна, z_lyk@ukr.net

ORCID: 0000-0002-9685-4654

Олександр Данилейко

інженер-технолог I категорії відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання»

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, вул. Казимира Малевича, буд. 11, м. Київ, 03150, Україна,

інженер I категорії кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», вул. Політехнічна, буд. 35, навчальний корпус 9, м. Київ, 03056, Україна, danyleiko.oleksandr@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8501-0421

Наталія Шамсутдінова

інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання»

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, вул. Казимира Малевича, буд. 11, м. Київ, 03150, Україна, shamsutaliia@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3525-0080

Валентина Бондарєва

заступник завідувача відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання»

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, вул. Казимира Малевича, буд. 11, м. Київ, 03150, Україна, laser-77@online.ua

ORCID: 0000-0002-4745-0995

Олександр Сіора

науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання»

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, вул. Казимира Малевича, буд. 11, м. Київ, 03150, Україна, siora_ov@ukr.net

ORCID: 0000-0003-1927-790X

Оплавлення покриттів лазерним випромінюванням, нанесених газотермічними способами, що виконується з метою зміни їхньої структури, є перспективним технологічним процесом. При цьому важливо знати значення максимальних температур, які досягаються у різних ділянках оброблюваних матеріалів, термічні цикли точок, що належать до цих ділянок і швидкості їх нагріву й охолодження. Експериментальне визначення цих параметрів пов'язане з великими труднощами через високі градієнти температур і високі швидкості нагріву й охолодження. Незважаючи на те, що у цьому напрямі проводилися дослідження (наприклад, оптичне вимірювання температур за допомогою пірометрів), отримана інформація не дає повної картини про розподіл температурних полів. Тому вкрай актуальним є їх математичне моделювання, оскільки отримані моделі дозволять за допомогою розрахункових методів оцінювати характер теплових полів ще до проведення дослідів на реальних зразках і, як наслідок, скоротити витрати часу й ресурсів на визначення оптимальних параметрів процесу, що призведуть до необхідних структурних змін у оброблюваному матеріалі. На базі розробленої математичної моделі теплових процесів, які відбуваються під час лазерного плакування газотермічних покриттів, розраховані температурні поля в зоні обробки, швидкості нагрівання й охолодження. Ці розрахунки дозволяють прогнозувати утворення структур на поверхні оброблених зразків, залежно від швидкості охолодження, що своєю чергою уможливує визначення параметрів лазерного випромінювання для плакування покриттів з оптимальною для таких умов структурою і, відповідно, заданими фізико-механічними властивостями. Прогнозні припущення про розвиток об'єкта досліджень – використання одержаних результатів для створення на їх основі технологій лазерного плакування покриттів систем Ni-Cr-B-Si і Fe-Ni-B-Si, нанесених на сталі та мідь у машинобудівній, поліграфічній, хімічній та інших галузях промисловості.

Ключові слова: покриття, сплави, що самі офлюсуються, лазерне оплавлення, математичне моделювання, аналітичний метод.

Вступ.

На сьогодні у зв'язку з постійним ростом споживання більшості природних ресурсів актуальності набуває розвиток ресурсозберігаючих технологій [1–5]. Використання покриттів на робочих поверхнях деталей дозволяє по-новому підійти до проблеми підвищення строку роботи деталей за рахунок формування поверхневого шару, що володіє більш високими експлуатаційними характеристиками [6]. Нанесення покриттів з подальшим оплавленням на деталі машин та механізмів, які піддаються зношуванню, дозволяє надати їм належної естетичної якості, зносостійкості, корозійної стійкості тощо, витративши для цього незначні ресурси, що дозволяє збільшити ресурс роботи деталі, вузла, устаткування або комплексу обладнання загалом та зменшити собівартість продукції [7]. Тому розробка та відпрацювання нових технологій оплавлення покриттів набуває актуальності.

Оплавлення покриттів лазерним випромінюванням, нанесених газотермічними способами, виконується з метою зміни їхньої структури і є перспективним технологічним процесом [8]. При цьому важливо знати значення максимальних температур, які досягаються у різних ділянках оброблюваних матеріалів, термічні цикли точок, що належать до цих ділянок, і швидкості їх нагріву й охолодження. Експериментальне визначення цих параметрів пов'язане з великими труднощами через високі градієнти температур і високі швидкості нагріву й охолодження [9]. Незважаючи на те, що у цьому напрямі про-

дилися дослідження (наприклад, оптичне вимірювання температур за допомогою пірометрів), отримана інформація не дає повної картини про розподіл температурних полів [10]. Тому вкрай актуальним є їх математичне моделювання, оскільки отримані моделі дозволять за допомогою розрахункових методів оцінювати характер теплових полів ще до проведення дослідів на реальних зразках і, як наслідок, скоротити витрати часу й ресурсів на визначення оптимальних параметрів процесу, що призведуть до необхідних структурних змін у оброблюваному матеріалі.

Технологія оплавлення покриттів лазерним випромінюванням з різними довжинами хвиль забезпечує широкі можливості отримання поверхневих шарів металу із необхідною структурою [11]. Це створює принципові передумови для формування покриттів із заданими службовими характеристиками. Дослідження, проведені у цьому напрямі, дотепер носили епізодичний характер і не дозволяли вирішити проблему створення технологічних процесів лазерного оплавлення покриттів. З цієї точки зору важливим є вивчення теплових умов формування таких поверхневих шарів у разі лазерної обробки, визначення оптимальних режимів оплавлення покриттів, що забезпечують необхідну структуру і властивості виробів. Це дозволить визначити нові перспективні галузі застосування таких процесів.

Метою роботи є зіставлення картини структурно-фазових перетворень, що протікають у зоні

лазерної дії, з розподілом теплових полів і зміни швидкостей нагріву і охолодження в оплавленому покритті та основному металі.

Методика роботи.

Для розрахунку теплових полів використовуються два основних методи: аналітичний і числовий. У разі аналітичного методу проводиться складання й вирішення лінійного диференційного рівняння теплопровідності, й рішення одержують у аналітичному вигляді. У разі числових розрахунків найчастіше здійснюється кінцево-елементна або кінцево-різнична апроксимація часткових похідних у вихідній диференціальній системі рівнянь, приведення її до системи алгебраїчних рівнянь і рішення отриманої системи. Найчастіше такі розрахунки здійснюються за допомогою спеціалізованих систем автоматизованої розробки. Ми розпочнемо розрахунки з аналітичного методу, оскільки задача з розрахунку теплових полів під час лазерної обробки матеріалів за допомогою аналітичних методів досить докладно розглядається у багатьох відкритих літературних джерелах.

Виклад основного матеріалу.

Задача формується для нагріву твердих середовищ, що складаються з двох матеріалів з різними теплофізичними властивостями, джерелом тепла постійної інтенсивності (при цьому ми вважаємо контакт між покриттям й основою ідеальним).

Для металів джерело тепла можна вважати з достатнім ступенем точності поверхневим, якщо радіус плями нагріву значно більший за ефективну глибину проникнення випромінювання ($r \gg a \cdot t^{1/2}$). Розрахунки показали, що максимальна температура на заданій глибині, а отже, і швидкості охолодження, слабо залежать від форми розподілу інтенсивності у світловій плямі [12].

У наших розрахунках ми приймаємо теплофізичні коефіцієнти матеріалів постійними (тобто такими, що не залежать від температури). На жаль, це призводить до утворення похибки, яку, втім, можна суттєво зменшити, якщо брати середні значення коефіцієнтів у деякому інтервалі температур. Також не враховувався рух металу у ванні (і, як наслідок, його вплив на процес масо- і теплопереносу).

Розрахункова схема має такий вигляд: підкладка розглядається як необмежене тіло, покриття – як пластина товщиною h . Матеріали мають різні теплофізичні коефіцієнти і перебувають у ідеальному тепловому контакті. Їхня початкова температура T_0 однакова. У початковий

момент часу вільна поверхня пластини миттєво нагрівається до температури T_c , яка міняється за певним законом протягом усього процесу нагріву-охолодження, що відповідає процесу лазерної обробки. На глибині $z=\infty$ підтримується початкова температура $T_0=\text{const}$, що умовно прийнята за 0°C . Необхідно знайти розподіл температури по глибині системи «необмежена пластина – напівобмежене тіло».

Згідно з [12] математичне формулювання задачі має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{1}{a_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2}; \\ t > 0, h \geq z \geq 0; \\ \frac{1}{a_2} \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \\ t > 0, \infty > z \geq h. \end{cases} \quad (1)$$

Граничні умови задачі мають вигляд:

$$z = 0 \quad T_c = f(W_p), \quad (2)$$

$$z = h \quad \begin{cases} T_1 = T_2 \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \end{cases} \quad (3)$$

$$t = 0 \quad T_1 = T_2 = 0 \quad (4)$$

Співвідношення (2–4) описують ідеальний тепловий контакт між шарами (рівність температур і теплових потоків на границі контакту).

Для стаціонарної задачі й нерухомого джерела нагріву рішення задачі згідно з [12] має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \theta_1 = \frac{T_1(z,t) - T_0}{T_c - T_0} &= \text{erfc} \frac{z}{2\sqrt{a_1 t}} - R \cdot \sum_{n=1}^{\infty} R^{n+1} \text{erfc} \frac{2nh - z}{2\sqrt{a_1 t}} + \\ &+ R \cdot \sum_{n=1}^{\infty} R^{n+1} \text{erfc} \frac{2nh + z}{2\sqrt{a_1 t}} - \\ &- \frac{T_0}{(1 + K_\varepsilon) \cdot (T_c - T_0)} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} \text{erfc} \frac{(2n-1)h - z}{2\sqrt{a_1 t}} + \\ &+ \frac{T_0}{(1 + K_\varepsilon) \cdot (T_c - T_0)} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} \text{erfc} \frac{(2n-1)h + z}{2\sqrt{a_1 t}} \quad (5) \\ \theta_2 = \frac{T_2(z,t) - T_0}{T_c - T_0} &= \frac{2K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon} \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} \text{erfc} \left[\frac{z - \frac{h}{5} + (2n-1)K_a^{-1/2}h}{2\sqrt{a_2 t}} \right] + \\ &+ \frac{T_0 K_\varepsilon}{(T_c - T_0)(1 + K_\varepsilon)} \text{erfc} \frac{z - \frac{h}{5}}{2\sqrt{a_2 t}} + \end{aligned}$$

$$+ \frac{2K_{\varepsilon}T_0}{(1+K_{\varepsilon})^2(T_c-T_0)} \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} \operatorname{erfc} \left[\frac{z - \frac{h}{5} + 2nK_a^{-1/2}h}{2\sqrt{a_2t}} \right] \quad (6)$$

де $R = \frac{1-K_{\varepsilon}}{1+K_{\varepsilon}}$; $K_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \rho_1}{\lambda_2 c_2 \rho_2}}$; $K_a = \frac{a_1}{a_2}$.

Тут:

θ_1, θ_2 – співвідношення температур, записані у безрозмірному вигляді (для того щоб розрахувати температуру, необхідно винести інші члени у праву сторону рівняння);

$T_1(z,t), T_2(z,t)$ – температури для відповідно першого й другого матеріалів (шарів тіла), залежні від координати z і часу дії джерела нагріву;

T_0 – початкова температура матеріалів, приймаємо її рівною 20°C ;

T_c – температура на поверхні першого матеріалу («пластини»), $^{\circ}\text{C}$;

z – глибина, для якої проводиться розрахунок, м;

t – час дії джерела нагріву, с;

h – товщина поверхневого матеріалу, м;

a_1, a_2 – коефіцієнти температуропровідності відповідно першого й другого матеріалів; їх значення обчислюються за формулою

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (7)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м \cdot °C); c – питома теплоємність, Дж/(кг \cdot °C); ρ – густина матеріалу, кг/м 3 .

Лазерне поверхнєве термічне зміцнення відбувається із високими швидкостями переміщення джерела нагріву. Прогріта доріжка розміщується вузькою смугою по лінії руху джерела. При цьому теплота розповсюджується у тілі в основному у напрямі, перпендикулярному до осі переміщення джерела. Для того щоб у розрахунках перейти від нерухомого джерела нагріву до рухомого, зробимо таке припущення [12]:

потокami тепла, що розповсюджуються у напрямку руху джерела, тобто у напрямку осі Ox , нехтуємо, і отримуємо спрощену схему потужного швидкодіючого джерела.

Тоді у формулах (5), (6) як час експозиції будемо використовувати час, за який лазерна пляма проходить через матеріальну точку по осі Ox . Його будемо обчислювати за такою формулою:

$$t = \frac{d_n}{V_{\text{лн}}} \quad (8)$$

де d_n – діаметр пучка випромінювання, мм;

$V_{\text{лн}}$ – швидкість руху променя по осі Ox , мм/с.

У технологічному процесі, що розглядається, на поверхні нанесеного матеріалу повинна досягатися температура T_c , що перевищує температуру плавлення матеріалу. Логічно було б сказати, що вона не повинна перевищувати температуру кипіння й випаровування, щоб уникнути інтенсивного випаровування матеріалу; але на практиці у ході процесу термообробки спостерігається факел парогазових викидів із зони плавлення [12]. Отже, досягається температура навіть більша, ніж температура випаровування. Оскільки температура плавлення самофлюсуючих наплавочних матеріалів на основі нікеля й заліза становить $1050...1200^{\circ}\text{C}$, а температура їх випаровування близька до 3000°C , то можна припустити, що температура теплового джерела на поверхні наплавленого сплаву не менша за 3000°C . Але у розрахунках необхідно більш точно визначати цей параметр. Скористаємося законом Стефана-Больцмана [12]:

$$W_p(T) = A(T)\sigma \cdot T_c^4, \quad (9)$$

де $A(T)$ – поглинальна здатність, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м $^2 \cdot \text{K}^4$) – постійна Стефана-Больцмана. Щільність потужності теплового джерела W_p являє собою відношення його потужності до площі розподілу й для плями d лазерного випромінювання може бути визначена як $W_p = \frac{P}{\pi \cdot d^2}$. У такому випадку T_c буде визначатися таким співвідношенням:

$$T_c = \sqrt[4]{\frac{P}{\pi \cdot \sigma \cdot A \cdot d^2}} \quad (10)$$

Згідно з даними літературних джерел [12], для більшості випадків лазерної термообробки $A \approx 0,8$. Цим значенням ми і будемо користуватися у розрахунках.

Розрахунок теплових полів

У таб. 1 подано теплофізичні характеристики матеріалів, які найчастіше використовуються як основа. Як матеріал для покриття в основному використовуються порошки різних сплавів із грануляцією у межах $0...300$ мкм. Найчастіше використовуються сплави на основі Ni і Fe. Одним зі складових легуючих елементів, що забезпечує зносостійкість, є Cr. Відповідно до цього виділимо такі групи матеріалів і приведемо їх узагальнені теплофізичні характеристики (див. таб. 2).

Проведемо розрахунок за формулами (5), (6) для таких технологічних параметрів процесу: матеріал основи – Ст3, матеріал покриття – ПГ-12Н-01, товщина покриття – $h = 1$ мм, діаметр лазерної плями – $d = 3$ мм, швидкість руху лазерного променя по осі – Ox $V_{\text{лн}} = 20$ мм/с, потужність

Таблиця 1

Матеріали, що використовуються як основа для покриття

Матеріал	λ , Вт/(м·°С)	c , Дж/(кг·°С)	ρ , кг/м ³
чавуни (у т. ч. леговані)	29,2	470	7570
низьковуглецеві, низко- і середньолеговані сталі (Ст3, 38ХНЗМФА, 20ХН і т.д.)	40	505	7790
високовуглецеві й високолеговані сталі (65Г, Х18Н10Т і т.д.)	25	460	7900

Таблиця 2

Матеріали, що використовуються як покриття

Матеріал	λ , Вт/(м·°С)	c , Дж/(кг·°С)	ρ , кг/м ³
на основі нікелю з вмістом хрому у межах 8...16% (сплави ПГ-12Н-01, ПГ-12Н-02, ПГ-АН9, НХ8С2Р3, ПГ-10Н-04 + 20%ПГ-АН6)	18	440	8670
на основі нікелю з вмістом хрому у межах 16...20% (сплави ПГ-12Н-03, ПГ-10Н-01, ПГ-АН6)	12,7	440	8310
на основі заліза, що не містять хром (ПГ-Н1, ПГ-НЕ3, ПГ-П3)	34,4	460	7930

лазера – $P=2$ кВт. Для цього будемо використовувати програмне забезпечення Maple 10. Результати розрахунку представлено на рис. 1 у вигляді кривої, що відповідає розподілу максимальних температур по глибині.

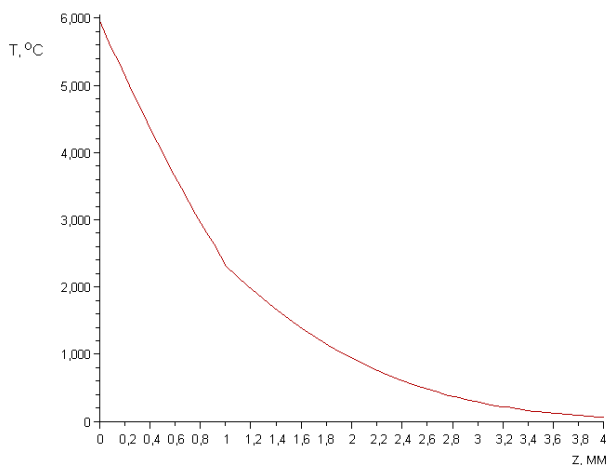


Рис. 1. Розподіл максимальних температур по глибині. Ст3+ПГ-12Н-01

У точці розділу матеріалів градієнт нахилу кривої розподілу температур відносно осей змінюється, що зумовлено різницею у теплофізичних властивостях матеріалів. Глибина проплавлення становить близько 1,6 мм, що перевищує товщину покриття.

Підберемо оптимальний режим термічної обробки, за якого глибина проплавлення буде приблизно рівною товщині покриття. Для цього побудуємо сімейство кривих для значень потужності лазерного променя від 400 до 2000 Вт (див. рис. 2–3).

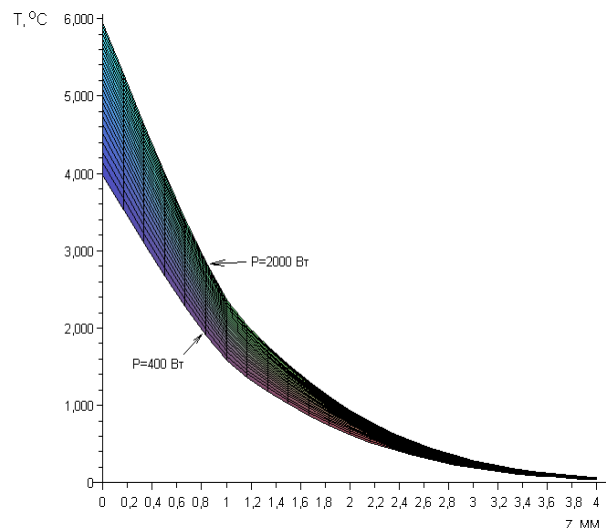


Рис. 2. Розподіл максимальних температур залежно від потужності джерела нагріву. Верхня крива – для потужності 2000 Вт, нижня – 400 Вт

Як бачимо, зміна потужності променя з 2 до 0,4 кВт призводить до зниження глибини про-

плавлення всього на 0,5 мм (з 1,6 до 1,1 мм). Це пов'язано з невисокою швидкістю руху променя (20 мм/с). Проведемо аналогічні розрахунки для потужності променя 1,5 кВт, для швидкостей від 20 до 60 мм/с.

Результати розрахунків у графічному вигляді представлено на рис. 4–5.

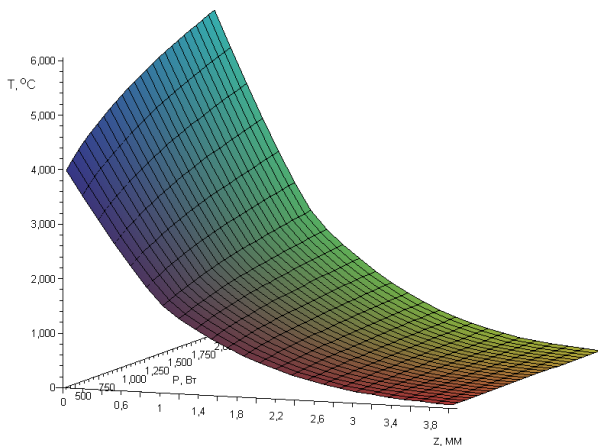


Рис. 3. Розподіл максимальних температур залежно від потужності джерела нагріву. По осі Oz – потужність джерела нагріву

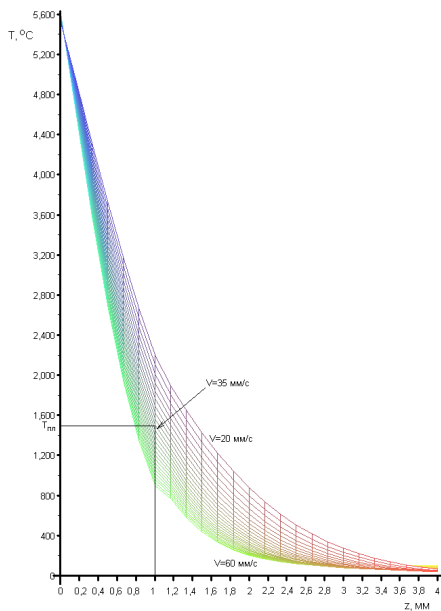


Рис. 4. Розподіл максимальних температур по глибині залежно від швидкості руху променя, $P=1,5$ кВт. Верхня крива для $V_{\text{лп}}=20$ мм/с, нижня для $V_{\text{лп}}=60$ мм/с

Оптимальним є режим, за якого глибина проплавлення становить 1 мм (тобто у рідку фазу переходить тільки матеріал, з якого складається покриття). Він досягається за потужності джерела нагріву 1,5 кВт і швидкості руху джерела 35 мм/с.

Різниця між градієнтами нахилу кривих розподілу температури у матеріалах основи й покриття до осей координат збільшується зі збільшенням різниці між теплофізичними характеристиками матеріалів.

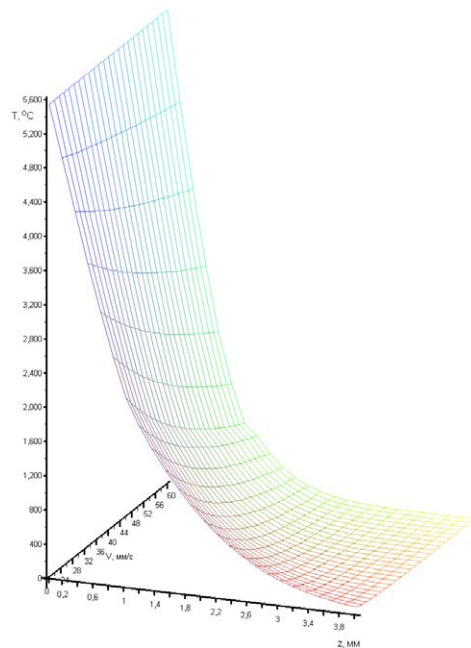


Рис. 5. Розподіл максимальних температур по глибині залежно від швидкості руху променя

Проведемо розрахунок для сталі 38ХН3МФА як матеріалу основи і сплаву ПГ-10Н-01 як матеріалу покриття. Параметри процесу: товщина покриття – $h=1$ мм, діаметр лазерної плями – $d=3$ мм, швидкість руху лазерного променя по осі – Ox $V_{\text{лп}}=20\text{...}60$ мм/с, потужність лазера – $P=1,5$ кВт. Результат представлено на рис. 6. Оптимальною є швидкість руху променя $V_{\text{лп}}=28$ мм/с, за якої глибина проплавлення рівна товщині покриття і становить 1 мм.

На жаль, результати цих розрахунків можна використовувати лише як оціночні, оскільки у разі постановки задачі приймалися вищенаведені припущення:

1. В усіх випадках у диференційних рівняннях теплофізичні коефіцієнти матеріалів (кое-

фіцієнт теплопровідності, коефіцієнт об'ємної теплоємності, коефіцієнт поверхневої тепловіддачі і т.д.) приймалися як незалежні від температури. Насправді ці параметри суттєво залежать від температури й врахування цих залежностей суттєво уточнює розрахунок.

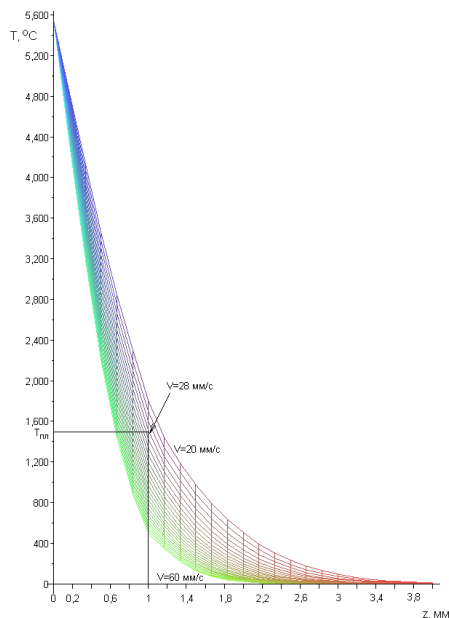


Рис. 6. Розподіл максимальних температур по глибині, матеріал основи – 38ХНЗМФА, матеріал покриття – ПГ-10Н-01. Потужність лазера 1,5 кВт

2. Розрахункові тіла розглядалися у вигляді необмежених чи напівобмежених, що суттєво спрощує постановку задачі у частині граничних умов. Для випадків локального лазерного термозміцнення, коли зона нагріву набагато менша за розміри деталей, що обробляються, і у процесі лазерної обробки границі деталі практично не нагріваються, це припущення є прийнятним. Але у тих випадках, коли протяжність зони обробки є співрозмірною з розмірами тіла, необхідно вводити у розрахунок реальну конфігурацію деталі, що обробляється з відповідними умовами теплового обміну на границях тіла.

3. Джерела нагріву представлялися у розрахунках у вигляді зосереджених точкових джерел або рівномірного розподілу по нормальному закону. Здебільшого більш ефективна лазерна обробка може бути забезпечена за допомогою інших законів розподілу густини потужності, але

їх врахування у аналітичних методах розрахунків є складною задачею.

4. Приймалися припущення про переважний напрям теплових потоків, які дозволяють суттєво спростити постановку теплової задачі (яка у окремих випадках доводилася до одномірного представлення; наша модель також фактично може розглядатися як одномірна). Якщо не вводити такі припущення, то, як правило, задачі лазерного поверхневого термозміцнення представляються складними тривимірними. Реалізація таких рішень за допомогою аналітичних методів є дуже складною.

5. Введені припущення про несуттєву роль параметрів, що не включені у теплові моделі, які реалізуються аналітичними методами. Наприклад, не враховується скрита теплота фазових переходів та ін.

Для отримання більш точних результатів потрібно використовувати числові методи вирішення теплової задачі.

Висновки.

1. Розроблена математична модель розрахунку теплових процесів під час лазерного оплавлення газотермічних покриттів.

2. У ході виконання обчислювальних експериментів встановлена кількісна залежність між технологічними параметрами лазерного випромінювання (довжина хвилі випромінювання, густина потужності і швидкість переміщення променя) і параметрами розплавленої зони. Приведена графічна залежність, що дозволяє вибрати швидкість переміщення променя, відповідні заданій глибині проплавлення. Розраховані швидкості нагріву і охолодження за різних параметрів лазерної обробки.

3. Результати цих розрахунків можна використовувати лише як оціночні, оскільки у разі постановки задачі приймалася велика кількість припущень, для спрощення вирішення задачі, які істотно вплинули на кінцевий результат. Для отримання більш точних результатів потрібно використовувати числові методи вирішення теплової задачі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lesinskyi V. et al. Substantiation of Projects That Account for Risk in the Resource-saving Technological Changes at Enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Т. 6. №. 1. С. 6–16. URL: <https://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149942>.

2. Alojnovich R.R. Resource-saving technologies in

cotton-growing economic efficiency indicator systems. *Plant Cell Biotechnology And Molecular Biology*. 2021. P. 134–140. URL: <https://www.ikppress.org/index.php/PCBMB/article/view/5943>.

3. Bernatskyi A. et al. The history of the creation of lasers and analysis of the impact of their application in the material processing on the development of certain industries. *History of science and technology*, 2021. T. 11, No. 1. P. 125–149. URL: <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2021-11-1-125-149>.

4. Kombarov V. et al. S-Shape feedrate scheduling method with smoothly-limited jerk in cyber-physical systems. *International Conference on Reliable Systems Engineering*. 2021. Springer, Cham. P. 54–68. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-83368-8_6.

5. Sambito M. et al. A systematic review of the hydrological, environmental and durability performance of permeable pavement systems. *Sustainability*. 2021. T. 13. No. 8. P. 4509. URL: <https://doi.org/10.3390/su13084509>.

6. Bernatsky A.V. Laser surface alloying of steel items. *The Paton Welding Journal*. 2013. No. 12. P. 2–8. URL: <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2013/pdfarticles/12/2.pdf>.

7. Meghwal A. et al. Thermal spray high-entropy alloy coatings: a review. *Journal of Thermal Spray Technology*.

2020. T. 29. No. 5. P. 857–893. URL: <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01047-0>.

8. Xu B. et al. Heat-mass transfer and its effects on the in-situ Al/SiC reactions in aluminum welds during wobbling laser melting injection of SiC particles. *Journal of Materials Processing Technology*. 2022. C. 117707. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117707>.

9. Mahmood M.A. et al. Laser coatings via state-of-the-art additive manufacturing: A review. *Coatings*. 2021. T. 11. No. 3. P. 296. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings11030296>.

10. Thawari N. et al. Influence of laser cladding parameters on distortion, thermal history and melt pool behaviour in multi-layer deposition of stellite 6: In-situ measurement. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. T. 860. C. 157894. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157894>.

11. Jin B. et al. Microstructure and properties of laser re-melting FeCoCrNiAl_{0.5}Si₆ high-entropy alloy coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2018. T. 349. P. 867–873. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.032>.

12. Рыкалин Н.Н. и др. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Москва : Машиностроение. 1985. 496 с.

CALCULATION OF THERMAL FIELDS FOR COATINGS, CREATED BY THERMAL SPRAYING UTILIZING LASER MELTING

Artemii Bernatskyi

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 11, Kazymyr Malevych St., Kyiv, 03150, Ukraine, Bernatskyi@paton.kiev.ua

OCRID: 0000-0002-8050-5580

Mykola Sokolovskyi

Engineer of the Department the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 11, Kazymyr Malevych St., Kyiv, 03150, Ukraine, m_sokolovskyi@paton.kiev.ua

OCRID: 0000-0003-3243-5060

Volodymyr Lukashenko

Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 11, Kazymyr Malevych St., Kyiv, 03150, Ukraine, z_lyk@ukr.net

OCRID: 0000-0002-9685-4654

Oleksandr Danyleiko

First Category Engineer-technologist of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 11, Kazymyr Malevych St., Kyiv, 03150, Ukraine,

First Category Engineer of the Department of Laser Systems and Advanced Technologies, E.O. Paton Educational and Research Institute of Material Science and Welding, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", St. Polytechnic, building 35, educational building 9, Kyiv, 03056, Ukraine, danyleiko.oleksandr@gmail.com

OCRID: 0000-0002-8501-0421

Nataliia Shamsutdinova

Engineer of the Department the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 11, Kazymyr Malevych St., Kyiv, 03150, Ukraine, shamsutaliia@gmail.com

OCRID: 0000-0002-3525-0080

Bondariewa Valentyna

Deputy Head of the Department the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 11, Kazymyr Malevych St., Kyiv, 03150, Ukraine, laser-77@online.ua

OCRID: 0000-0002-4745-0995

Oleksandr Siora

Researcher of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 11, Kazymyr Malevych St., Kyiv, 03150, Ukraine, siora_ov@ukr.net

OCRID: 0000-0003-1927-790X

Summary. Laser melting of coatings, created with the help of thermal spraying, performed with the goal of changing their structure, is a promising technological process. At the same time, it is important to know the maximum temperatures during the different sections of the processed material, as well as the thermal cycles of the points belonging to these sections and their heating and cooling rates. Due to high temperature gradients as well as high heating and cooling rates, experimental determination of these parameters is associated with great difficulties. Despite the research, conducted in this direction (for example, pyrometrical measurement of temperatures), the obtained information does not give a complete picture of the distribution of temperature fields. For these reasons, their mathematical modeling is extremely relevant, since the obtained models will allow for usage of calculation methods to evaluate the nature of thermal fields even before conducting experiments on real samples, and, as a result, to reduce the time and resources spent on determining the optimal process parameters that will lead to the necessary structural changes in the processed material. Based on the developed mathematical model of thermal processes that occur during laser melting of coatings, created using thermal spraying, various temperature fields, as well as heating and cooling rates in the processing zone were calculated. These calculations allow for prediction of the formation of structures on the surface of the processed samples depending on the cooling rate, which, in turn, makes it possible to determine the laser radiation parameters for laser cladding of coatings with the optimal structure for the specified conditions, and, accordingly, specified physical and mechanical properties. Predictive assumptions about the development of the object of research – the use of the obtained results for the creation of laser melting of coatings technologies of Ni-Cr-B-Si and Fe-Ni-B-Si systems applied to steel and copper in the machine-building, printing industry, chemical industry and other sectors.

Key words: coatings, self-fluxing alloys, laser melting, mathematic modelling, analytical methods.

REFERENCES

1. Lesynskiy, V., Yemelyanov, O., Zarytska, O., Symak, A., & Koleshchuk, O. (2018). Substantiation of projects that account for risk in the resource-saving technological changes at enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(1), 6–16. Retrieved from: <https://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149942>.
2. Alojnovich, R.R. (2021). Resource-saving technologies in cotton-growing economic efficiency indicator systems. *Plant Cell Biotechnology And Molecular Biology*, 22(7–8), 134–140. Retrieved from: <https://www.ikppress.org/index.php/PCBMB/article/view/5943>.
3. Bernatskyi, A., & Khaskin, V. (2021). The history of the creation of lasers and analysis of the impact

of their application in the material processing on the development of certain industries. *History of science and technology*, 11(1), 125–149. Retrieved from: <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2021-11-1-125-149>.

4. Kombarov, V., Sorokin, V., Tsegelnyk, Y., Plankovskyy, S., Aksonov, Y., & Fojtů, O. (2021, September). S-Shape feedrate scheduling method with smoothly-limited jerk in cyber-physical systems. In *International Conference on Reliable Systems Engineering*. Pp. 54–68. Springer, Cham. Retrieved from: https://doi.org/10.1007/978-3-030-83368-8_6.

5. Sambito, M., Severino, A., Freni, G., & Neduzha, L. (2021). A systematic review of the hydrological, environmental and durability performance of permeable pavement systems. *Sustainability*, 13(8), 4509. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/su13084509>

6. Bernatsky, A.V. (2013). Laser surface alloying of steel items. *The Paton Welding Journal*, 12, 2–8. Retrieved from: <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2013/pdfarticles/12/2.pdf>.

7. Meghwal, A., Anupam, A., Murty, B.S., Berndt, C.C., Kottada, R.S., & Ang, A.S.M. (2020). Thermal spray high-entropy alloy coatings: a review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 29(5), 857–893. Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01047-0>.

8. Xu, B., Jiang, P., Wang, Y., Zhao, J., & Geng, S. (2022). Heat-mass transfer and its effects on the in-situ Al/SiC reactions in aluminum welds during wobbling laser melting injection of SiC particles. *Journal of Materials Processing Technology*, 117707. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117707>.

9. Mahmood, M.A., Bănică, A., Ristoscu, C., Becherescu, N., & Mihăilescu, I. N. (2021). Laser coatings via state-of-the-art additive manufacturing: A review. *Coatings*, 11(3), 296. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/coatings11030296>.

10. Thawari, N., Gullipalli, C., Chandak, A., & Gupta, T.V.K. (2021). Influence of laser cladding parameters on distortion, thermal history and melt pool behaviour in multi-layer deposition of stellite 6: In-situ measurement. *Journal of Alloys and Compounds*, 860, 157894. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157894>.

11. Jin, B., Zhang, N., Guan, S., Zhang, Y., & Li, D. (2018). Microstructure and properties of laser re-melting FeCoCrNiAl_{0.5}Si₆ high-entropy alloy coatings. *Surface and Coatings Technology*, 349, 867–873. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.032>.

12. Rykalin, N.N., Uglov, A.A., Zuev, I.V., & Kokora, A.N. (1985). *Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov [Laser and electron-beam processing of materials]*. Moscow: Mashinostroenie.

Стаття надійшла 19.05.2022