

7. Касаткин А. Г., Дыгнерский Ю. И., Умаров С. У. К расчету колонн с провальными тарелками // Химическая Промышленность. 1958. № 3. С. 38–45.
8. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник. Москва: Химия, 1973. 752 с.
9. Sherwood T. K., Shipley G. H., Holloway F. A. L. Flooding Velocities in Packed Columns // Industrial & Engineering Chemistry. 1938. Vol. 30, Issue 7. P. 765–769. doi: <http://dx.doi.org/10.1021/ie50343a008>
10. Кочергин Н. А., Олевский В. М., Дильман В. В. Исследование работы тарелок провального типа в условиях ректификации // Химическая Промышленность. 1960. № 7. С. 63–67.

Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Созонтов В. І.

Дата надходження рукопису 03.05.2018

Тараненко Геннадий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, кафедра машиноведения и оборудования промышленных предприятий, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, пр. Центральный, 59-а, г. Северодонецк, Украина, 93400
E-mail: gтараненко@ukr.net

УДК 004.94:519.63

DOI: 10.15587/2313-8416.2018.131866

ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ СПЛАВЛЕННІ БІМЕТАЛУ СКАНУЮЧИМ ЛАЗЕРОМ ДЛЯ ПРОМЕНІВ, ЩО ФОКУСУЮТЬСЯ В ПРЯМОКУТНИК І В КРУГ

© **О. В. Перекіпська, В. А. Третяк, Г. А. Остапенко**

Розглянуто задачу моделювання теплового поля в процесі сплавлення біметалу скануючим лазером та променем, що фокусується в смугу. Використано математичну модель процесу, що являє собою граничну задачу у вигляді тривимірного нестационарного диференційного рівняння в частинних похідних. Проведено порівняння результатів моделювання при різних варіантах форми лазерного променя та розподілом потужності за ключовими характеристиками

Ключові слова: *сплавлення біметалу, лазерне наплавлення, теплове поле, метод скінчених різниць, наскрізний розрахунок*

1. Вступ

Останнім часом в промисловості поширюється використання біметалів, завдяки їхнім фізико-механічним властивостям. Для виготовлення біметалів може бути використане лазерне наплавлення, причому в деяких випадках даний метод має ряд суттєвих переваг [1, 2]. Однією з таких переваг є можливість автоматизації процесу [1], що потребує інструментів комп'ютерного моделювання. Крім того, методи числового моделювання дозволяють суттєво зекономити ресурси на натурні дослідження [3]. Таким чином, створення програмних засобів для моделювання та автоматизації процесу сплавлення біметалу за допомогою лазера є актуальною.

Дана стаття присвячена розв'язанню задачі моделювання температурного поля в процесі сплавлення біметалу за допомогою лазера. Розглядається метод отримання двошарового біметалу шляхом лазерного наплавлення шару покриття на основу. Основними способами доставки в зону наплавлення матеріалу покриття при лазерному сплавленні біметалу є попереднє нанесення та інжекція в зону дії лазерного випромінювання [4], в роботі розглядається останній. Особливу цікавість представляє спосіб попереднього розплавлення лазером матеріалу основи, технологічно він може бути реалізований за допомогою сканування області подачі матеріалу покриття стандартним лазером з круглою плямою фокусування або з використанням лазера, що фокусується в смугу, відповід-

ну області подачі покриття. Для вибору одного з них виникає необхідність проведення порівняльного аналізу динаміки теплового поля для цих варіантів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На сьогодні існує велика кількість програмних засобів чисельного моделювання різноманітних процесів, в тому числі і для моделювання температурного поля. Найвідомішими засобами моделювання є: Ansys (ANSYS, Inc.) реалізує метод скінчених елементів і застосовується для розв'язку та оптимізації задач газодинаміки, теплофізики, міцності тощо. Star-CD (Computational Dynamics) є ефективним інструментом для задач гідродинаміки. PHOENICS дозволяє моделювати рух газів та рідин, зручний для моделювання напружено-деформаційного стану. NASTRAN створений для моделювання напружено-деформаційного стану. LVMFlow – розроблений для автоматизації ливарних процесів [3].

Зазначені програмні засоби є потужними та зручними, проте необхідність враховувати такі особливості процесу як локальність, інтенсивність впливу та високу швидкість лазерного променя, практично унеможливають використання наведених інструментів для її розв'язання. Для отримання результатів розрахунку за допомогою цих засобів необхідно або значно спрощувати математичну модель, або сам алгоритм розрахунків, що може приз-

вести до зменшення точності та отримання неправильних результатів.

Програмний комплекс LaserWorks не враховує інжективне подання металу в зону наплавлення, що зумовлює потребу розробки на його основі програмного засобу моделювання динаміки температурного поля при сплавленні біметалу скануючим лазером.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є проведення порівняння результатів та визначення оптимальних параметрів моделювання температурного поля при сплавленні біметалу скануючим лазером для променів, що фокусується в прямокутник і в круг.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- проаналізувати проблему математичного моделювання процесів теплообміну при сплавленні біметалу скануючим лазером;
- реалізувати метод моделювання лазерного променя в двох варіантах: як круг та як прямокутник;
- проаналізувати вплив форми лазерного променя на розподіл потужності та швидкість охолодження.

4. Матеріали дослідження

При інжекції у створювану на робочій поверхні ванну розплаву перпендикулярно лазерному променю газовим потоком через сопло плазмотрона подається матеріал покриття. При цьому поверхня деталі оплавляється лазерним випромінюванням, нагріті частинки порошку потрапляють на розплавлену поверхню, відбувається перемішування і дифузійне взаємопроникнення матеріалу частинок верхнього шару та підкладки. Утворене покриття охолоджується і кристалізується [5, 6].

Лазерне наплавлення включає такі види теплообміну, як теплопровідність і випромінювання. У розплавленій ванні відбуваються процеси тепломасопереносу і деформація вільних поверхонь. Оскільки покриття наноситься за допомогою плазмотрону, в технологічному процесі наплавлення присутні також явища переносу в плазмі. Структура порошку є композитною, отже необхідно враховувати особливості теплофізичних властивостей композитів. Процеси плавлення і подальшої кристалізації, що відбуваються внаслідок наплавлення, відносять задачу до задач типу Стефана.

Включити до математичної моделі всі фізичні явища наразі немає змоги, тому дослідниками запропоновані спрощені математичні моделі [3, 7]. В спрощеній моделі береться до уваги тільки теплопровідність та конвекція [8]. Променим теплообміном можна знехтувати, оскільки за даними експериментів його вплив на процес є незначним [3, 6].

В задачі, що моделюється, область визначення має прямолінійні межі, отже для розв'язання тривимірного нестационарного рівняння теплопровідності доцільно використовувати метод скінченних різниць [3]. Для лінеаризації задачі використано метод двоциклічного по-компонентного розщеплення на основі схеми Кранка-Ніколсона [9].

Наявність в моделі рухомого нагрівального елемента вимагає використання адаптивних сіток. Ме-

тод побудови адаптивної різницевої сітки, спираючись на чисельний сенсор, обчислений по результатам розрахунку для попереднього моменту часу, визначає розподіл вузлів, який використовується для пошуку функції розв'язку в наступний момент часу [10].

Розрахункова область має форму прямокутного паралелепіпеда зі сторонами L_x , L_y , L_z і висотою покриття h та включає в себе підкладку D_2 та покриття D_1 . Область покриття змінює з часом свої геометричні параметри, наростаючи вздовж осі Oy .

Лазерний промінь моделюється в двох варіантах: як круг та як прямокутник заданої ширини, що дорівнює ширині деталі (рис. 1). Для визначення оптимальних параметрів було проведено розрахунок для обох випадків та порівняння результатів.

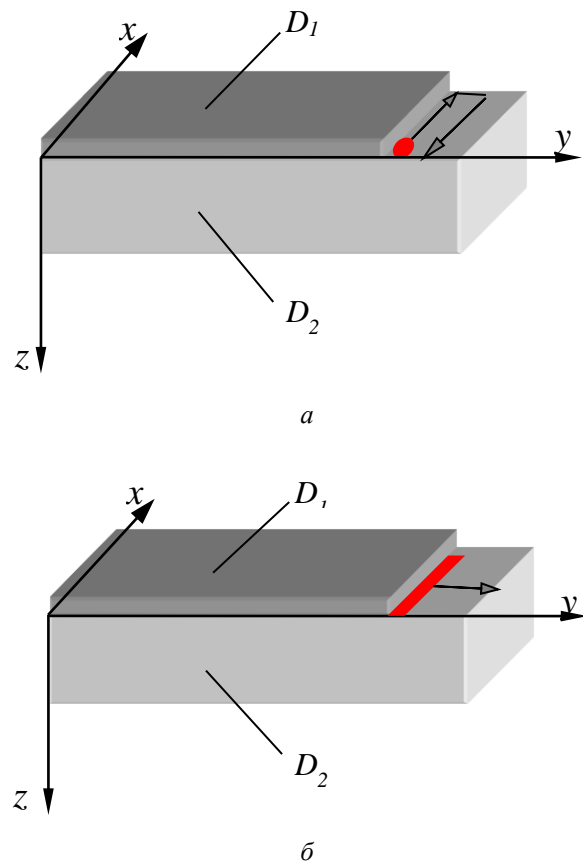


Рис. 1. Розрахункова область з променем лазера, що фокусується: *a* – в круг; *б* – в прямокутник

5. Результати досліджень та їх обговорення

Геометричні та теплофізичні параметри деталі було встановлено за замовчуванням. Швидкості руху променів було підібрано так, щоб час, за який промінь досягне границі області, був однаковий для обох варіантів. Для лазерного променя, що фокусується в круг і рухається вздовж осі Ox , нагріваючи деталь смуга за смугою, встановлено швидкість $V_1=25$ см/с. Так як ширина деталі, для якої проводився розрахунок, $L_x=2$ см, а довжина $L_y=2$ см, промінь проходить одну смугу за 0,08 с, а деталь за 1,6 с. Відповідно промінь, що фокусується в прямокутник повинен рухатися зі швидкістю $V_2=1,25$ см/с.

Потужність променів було обрано так, щоб температура в зоні нагріву була приблизно рівною в

обох випадках. Потужність для лазера, що фокусується в круг, дорівнює $1 \cdot 10^8 \text{ кг/с}^3$, а для лазера, що фокусується в прямокутник – $0,7 \cdot 10^8 \text{ кг/с}^3$.

Результати моделювання, в вигляді тривимірних графіків температурного поля в момент часу 0,09 с, представлені на рис. 2.

В табл. 1 наведено значення температури, отримані при заданих параметрах.

Однією з ключових характеристик процесу є швидкість охолодження поверхні підкладки після проходження лазера. Якщо верхні шари підкладки

встигають охолотитись до подачі на них матеріалу наплавлення, сплавлення біметалу відбувається нерівномірно, виникають тріщини, здутті в покритті, можливе відшаровування верхнього шару. Виникнення таких дефектів вимагатиме повної очистки деталі від шару наплавлення та повторної обробки.

В табл. 2 приводиться температура, що встановлюється після переходу лазерного променя на наступну смугу.

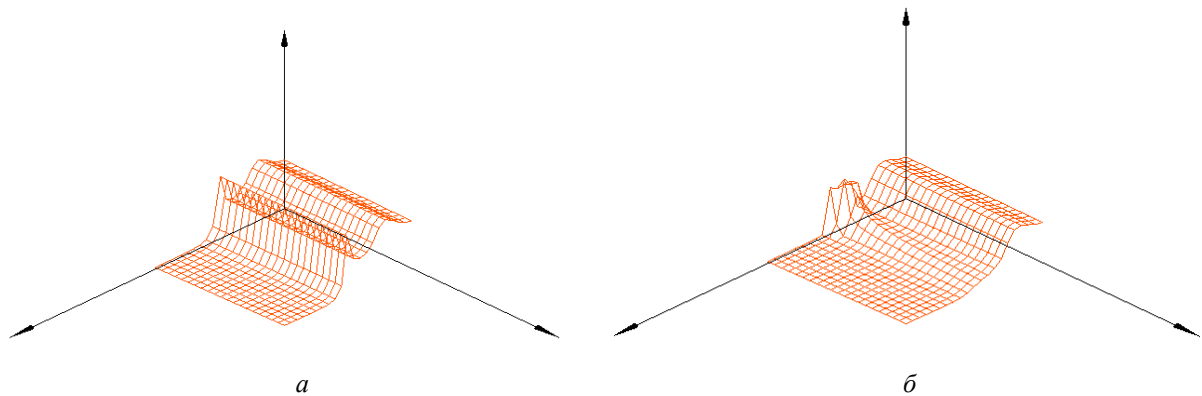


Рис. 2. Температурне поле на межі двох шарів для лазера з рівномірним розподілом, що фокусується: *a* – в прямокутник; *б* – в круг

Таблиця 1

Значення максимальної температури в різний момент часу в зоні нагріву лазера

Час, с	Температура, °С		
	Лазер фокусується в круг, рівномірний розподіл	Лазер фокусується в круг, гаусів розподіл	Лазер фокусується в прямокутник
0,4	715	440	694
0,8	675	500	735
1,2	713	487	802
1,6	822	503	824

Таблиця 2

Значення мінімальної температури на попередній смузі після проходження лазера

Час, с	Температура, °С		
	Лазер фокусується в круг, рівномірний розподіл	Лазер фокусується в круг, гаусів розподіл	Лазер фокусується в прямокутник
0,4	145	38	392
0,8	135	40	385
1,2	135	49	324
1,6	190	43	417

З табл. 2 видно, що при рівній температурі в зоні нагріву на наступному кроці попередня смуга охолоджується значно повільніше при використанні лазера, що фокусується в прямокутник.

Загальна потужність лазера розраховується за формулою:

$$P = \iint_{\Gamma} q(x, y) dy dx$$

де Γ – зона нагріву; q – розподіл щільності потужності джерел енергії.

При рівномірному розподілі q дорівнює повній потужності лазера P_0 , при гаусовому обчислюється за формулою

$$q = P_0 e^{-5 \frac{x^2 + y^2}{r^2}}$$

Для променя, що фокусується в прямокутник, маємо:

$$\int_0^{L_x} \int_0^d q(x, y) dy dx = \int_0^{L_x} \int_0^d P_0 dy dx = P_0 \int_0^{L_x} \int_0^d dy dx = 0.5 P_0 = 3.5 \cdot 10^7$$

Для променя, що фокусується в круг і рівномірного розподілу:

$$\int_{-r}^r \int_{-\sqrt{r^2-x^2}}^{\sqrt{r^2-x^2}} q(x, y) dy dx = \int_{-r}^r \int_{-\sqrt{r^2-x^2}}^{\sqrt{r^2-x^2}} P_0 dy dx =$$

$$= P_0 \int_{-0.125}^{0.125} \int_{-\sqrt{0.125^2-x^2}}^{\sqrt{0.125^2-x^2}} dy dx = 0.049 P_0 = 4.9 \cdot 10^6$$

Для променя, що фокусується в круг і гаусового розподілу:

$$\int_{-r}^r \int_{-\sqrt{r^2-x^2}}^{\sqrt{r^2-x^2}} q(x, y) dy dx = \int_{-r}^r \int_{-\sqrt{r^2-x^2}}^{\sqrt{r^2-x^2}} P_0 e^{-\frac{5x^2+y^2}{r^2}} dy dx =$$

$$= P_0 \int_{-0.125}^{0.125} \int_{-\sqrt{0.125^2-x^2}}^{\sqrt{0.125^2-x^2}} e^{-\frac{5x^2+y^2}{0.125^2}} dy dx = 0.00975 P_0 = 9.7 \cdot 10^5$$

6. Висновки

1. Проаналізовано проблему математичного моделювання процесів теплообміну при сплавленні біметалу скануючим лазером, за математичну модель обрано нестационарне тривимірне рівняння теплообміну, що враховує конвективний теплообмін.

2. Реалізовано метод моделювання лазерного променя в двох варіантах: як круг та як прямокутник.

3. Після проведення порівняння результатів моделювання при різних варіантах форми лазерного променя та розподілом потужності за ключовими характеристиками можна зробити наступні висновки: лазерний промінь, що фокусується в круг з гаусовим розподілом вимагає найменшої потужності, але дає найгірший результат за швидкістю охолодження поверхні після проходження; промінь, що фокусується в прямокутник, вимагає меншої потужності в точці для досягнення необхідної температури в зоні нагріву, і при його використанні поверхня підкладки менше встигає охолонути перед подачею матеріалу наплавлення, однак більша площа фокусу вимагає значно більших енергозатрат.

Література

1. Шмидт М., Куринцев С. В. Получение биметаллических заготовок с помощью лазерной сварки проплавным швом // Автоматическая сварка. 2014. № 4. С. 47–51.
2. Головки Л. Ф. Применение лазерной технологии для спекания алмазосодержащих композиционных материалов // Автоматическая сварка. 2008. № 8 (664). С. 15–23.
3. Комп'ютерне моделювання у лазерних технологіях: монографія // Головки Л. Ф. та ін. Київ: ВПП "Текст", 2015. 236 с.
4. Головки Л. Ф. Возможности підвищення якості зносостійких покриттів застосуванням лазерного опромінення // Вісник Хмельницького національного університету. 2012. № 1. С. 20–28.
5. Grabowski A., Formanek B., Sozanska B. M. Laser remelting of Al-Fe-TiO powder composite on aluminium matrix // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2009. Vol. 1, Issue 33. P. 78–85.
6. Калванд А. Особенности процессов плавления-затвердевания при погружении блоков в расплав высокотемпературного кориума // Ядерная физика та енергетика. 2009. Т. 10, № 2. С. 178–184.
7. Перелома В. А. и др. Некоторые особенности лазерной обработки металлических материалов // Процессы лития. 1998. № 3-4. С. 9–16.
8. Modelling laser induced melting / Verhoeven J. C. J. et. al. // Mathematical and Computer Modelling. 2003. Vol. 37, Issue 3-4. P. 419–437. doi: 10.1016/s0895-7177(03)00017-7
9. Марчук Г. И. Методы расщепления. Москва: Наука, 1988. 264 с.
10. Третяк В. А. Усовершенствование адаптивного метода построения сеток для задач теплопроводности с нестационарным источником энергии: зб. наук. пр. // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. 2012. № 7. С. 197–206.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Аушева Н. М.
Дата надходження рукопису 30.04.2018*

Перекіпська Оксана Василівна, кафедра автоматизації та проектування енергетичних процесів та систем, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: kusanchik@gmail.com

Третяк Валерія Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизації та проектування енергетичних процесів та систем, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
Email: valery.tretyak@gmail.com

Остапенко Ганна Анатоліївна, кафедра автоматизації та проектування енергетичних процесів та систем Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056