Запропонований підхід передбачає ітераційний процес уточнення параметрів до досягнення необхідної точності. Для цього рівняння теплового балансу та рівняння пружності доцільно об'єднати в єдину крайову задачу. Найефективнішим методом її розв'язання є метод скінченних елементів, який дозволяє спростити обчислення та підвищити точність результатів.

Таким чином, врахування тепло-пружних деформацій є необхідною умовою підвищення точності та надійності гідростатичних опор важких верстатів. Комплексний підхід до моделювання дозволяє більш повно оцінити вплив температурних і силових факторів на працездатність вузла та забезпечити стабільність його роботи в реальних умовах експлуатації.

Список посилань

1. Федориненко Д.Ю. Шпиндельні гідростатичні підшипники: монографія / Д. Ю. Федориненко, С.П. Сапон – Чернігів: ЧНТУ, 2016. – 405 с.

2. Сапон С. П. Моделювання траєкторій руху шпинделя на регульованих гідростатичних опорах / С.П. Сапон // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»: науковий збірник. – Чернігів: ЧНТУ, 2014. – №2(73). – С. 83 – 92.

УДК 536.46:621.785.3:681.7.067.2

Салій С. С., асистент
Головко Л. Ф., докт. техн. наук, професор
Кагляк О.Д., канд. техн. наук, доцент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, saliysergiys@gmail.com

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ФРОНТУ ПЛАВЛЕННЯ В ЗАДАЧІ СТЕФАНА ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ЛИВАРНИХ ПРОЦЕСІВ

Комбінований лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів передбачає одночасну дію гарячого розплаву на поверхню, яка попередньо опромінювалась лазерним випромінюванням. При цьому формування якісного металургійного з'єднання залежить від динаміки плавлення поверхневого шару функціональної складової та розвитку зони дифузійного контакту. Математичне моделювання цих процесів вимагає розв'язання класичної задачі Стефана про міжфазний перехід з рухомою границею розділу фаз, що є першочерговим для оптимізації режимів обробки та передбачення якості біметалу[1-3].

Задача Стефана при лазерно-ливарному формуванні біметалу характеризується високою нестаціонарністю термічного поля, яке визначається потужністю лазерного пучка (P = 500–2000 Вт), його розмірами у фокусі (d = 1–5 мм), швидкістю сканування (v = 5–50 мм/с) та теплофізичними параметрами матеріалів системи ХН60ВТ–Ст3. Фронт плавлення рухається з нестійкою межею контакту твердої і рідкої фаз, що вимагає застосування явних числових схем для адекватного відтворення цього процесу[4-5].

У роботі розроблено та апробовано метод числового розв'язання задачі Стефана з рухомою межею фаз для умов лазерного опромінення. Задача вирішується у двовимірній постановці з розрахунком температурного поля в обох фазах (твердій та рідкій) із врахуванням граничних умов типу Робіна та Дірихле. Умовна межа розділу фаз визначається за критерієм T = Tпл з ітераційним уточненням положення фронту на кожному часовому шарі. Для дискретизації часової змінної застосовується явна схема Ейлера з адаптивним кроком, а для просторової дискретизації — метод скінченних різниць на рівномірній прямокутній сітці із кроком $\Delta x = \Delta y = 0{,}1$ мм.

Результати моделювання показали, що за потужності лазера P = 1500 Вт та швидкості сканування v = 20 мм/с на функціональному шарі формується зона плавлення глибиною 40–60 мкм, що відповідає експериментальним спостереженням. Фронт плавлення рухається нестійко з локальним утворенням мікровиступів на межі розділу, що сприяє інтенсифікації

дифузійного контакту. Проведений аналіз залежності глибини зони плавлення від потужності лазера виявив близько квадратичну залежність, що узгоджується з теоретичними передбаченнями для напівнескінченного тіла при поверхневому нагріванні поверхні до температури плавлення.

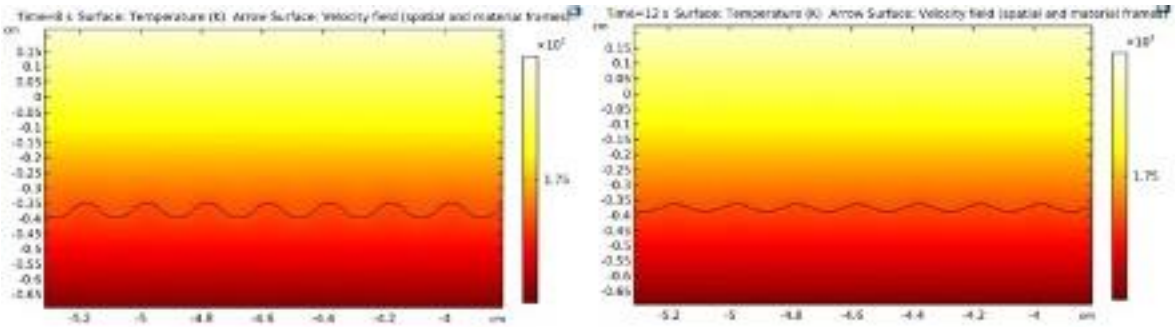

Рис. 1 – Зміна температурного поля і межі фаз середовищ в області розрахунку

Критичним фактором, що впливає на форму та стійкість фронту плавлення, виявилася конвекція розплаву, причому урахування конвективного переносу маси та енергії привело до зменшення температури на межі розділу фаз на 80–120 К порівняно з випадком чистої теплопровідності. Гідродинамічне моделювання потоків розплаву виконано на основі рівнянь Нав'є–Стокса в наближенні Буссінеска з урахуванням температурної залежності в'язкості розплаву нікелевого сплаву $\eta(T) = \eta_0 \exp(E/(RT))$. Максимальні швидкості конвективних потоків у зоні розплаву досягають 50–80 см/с, що суттєво впливає на форму зони з'єднання та розподіл легувальних елементів.

Комбінований числово-експериментальний аналіз дав змогу встановити оптимальні режими лазерного опромінення для забезпечення глибини плавлення 40–50 мкм, яка забезпечує максимальну міцність з'єднання біметалу. Розроблені рекомендації щодо вибору параметрів сканування лазерного пучка залежно від товщини функціонального шару та хімічного складу матеріалів.

Висновки. Чисельне моделювання задачі Стефана для лазерно-ливарних процесів виготовлення біметалів підтвердило основні експериментальні спостереження щодо глибини зони плавлення (40–60 мкм) та характеру нестійкості фронту плавлення. Врахування конвекції розплаву виявило суттєвий вплив на динаміку міжфазної границі та передбачуваний розподіл легувальних елементів. Розроблена числова модель дозволяє оптимізувати режими обробки для досягнення максимальної якості металургійного з'єднання та може бути розширена на тривимірні постановки з урахуванням електромагнітних ефектів індукційного нагрівання основи.

Список посилань

1. Vela, E., Hafez, M., & Régnier, S. Laser-Induced Thermocapillary Convection for Mesoscale Manipulation. International Journal of Optomechatronics, 3(4), 2009. 289–302. https://doi.org/10.1080/15599610903389477

2. W.H. Yu, S.L. Sing, C.K. Chua, C.N Kuo, X.L. Tian, Particle-reinforced metal matrix nanocomposites fabricated by selective laser melting: A state of the art review, Prog. Mater. Sci. 104, 330-379 (2019). https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.04.006

3. O. Politano, Florence Baras. Thermocapillary convection in a laser-heated Ni melt pool: A molecular dynamics study. Journal of Applied Physics, 2023, 134 (9), ⟨10.1063/5.0167061⟩. https://doi.org/10.1063/5.0167061

4. Головко Л. Ф., Романенко В. В., Блощицин М. С., Кагляк О. Д., Салій С. С., Савченко О. А., Свічкар І. В. Виготовлення біметалів з використанням ливарного процесу і лазерної обробки [Електронний ресурс]: монографія. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 220 с. – Режим доступу: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/53932

5. Salii S., Golovko L., Kaglyak O., Kapustynskyi O., Višniakov N. The Formation of a Low-Carbon Steel/Ni-Cr-W Alloy Bimetallic Material via Liquid–Solid Compound Casting with a Laser Assisted Solid Surface. Machines. 2024. Vol. 12. P. 522. https://doi.org/10.3390/machines12080522