

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.033

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСІВ  
СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ПОРОШКІВ**

Довгий С.О.<sup>1</sup>, Довгий Б.Т.<sup>2</sup>, Копійка О.В.<sup>1</sup>,  
Моїсеєнко С.В.<sup>3</sup>, Редчиць Д.О.<sup>4</sup>, Тучина У.М.<sup>4</sup>

*<sup>1</sup>Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору  
НАНУ (Україна)*

*<sup>2</sup>Імперський коледж Лондона (Велика Британія)*

*<sup>3</sup>Херсонський національний технічний університет (Україна)*

*<sup>4</sup>Інститут транспортних систем і технологій НАН України (Україна)*

Селективне лазерне плавлення (Selective Laser Melting – SLM) – це одна з адитивних технологій, суть якої полягає в створенні різноманітних виробів за допомогою лазерного плавлення металевих порошків за заданими CAD-моделями. Технологія SLM є концептуально простою, але фізика, на якій вона ґрунтується, складна і охоплює широкий діапазон часових і просторових масштабів.

Загальна математична постановка задачі селективного лазерного плавлення металевих порошків зводиться до постановки окремих структурно зв'язаних між собою задач. А саме, таких як: задача про нестационарний теплообмін з урахуванням фазових переходів при нагріванні металевих порошків рухомим лазерним променем; задача про динаміку рідкого металу в ванні розплаву з урахуванням об'ємних і поверхневих сил; задача про визначення нестационарної форми вільної поверхні ванни розплаву за наявності тиску віддачі, а також виникнення пор і розбризкування рідкого металу.

Задача про нестационарний теплообмін є найбільш важливою, оскільки вичерпна інформація про тепловий режим потрібна як при описі процесів плавлення та кристалізації, так і при оцінюванні глобального напружено-деформованого стану тіла, отриманого селективним лазерним плавленням. Розв'язання цієї задачі без явного опису динаміки розплаву, але з адекватним прогнозом формування ванни за ізотермами ліквідусу та солідусу є найбільш поширеним методом розрахунку залежності властивостей виробу від параметрів технологічного процесу.

Основне рівняння, яке описує нестационарний просторовий переніс тепла є рівняння теплопровідності. З метою урахування фазових переходів рівняння теплопровідності розв'язувалось відносно ентальпії. В якості початкових умов

задавалася постійна температура 293°K. Граничні умови склалися з умов Діріхле, Неймана та Ньютона. При цьому враховувалися втрати тепла за рахунок конвекції та випромінювання. У розробленій моделі густина, коефіцієнт теплопровідності та питома теплоємність є функціями температури. Також враховувалася прихована теплота фазових перетворень (плавлення та випаровування).

Рівняння теплопровідності записувалось в криволінійній системі координат. Дискретний аналог вихідного рівняння теплопровідності побудовано методом скінчених об'ємів. Розроблено алгоритм, який базується на неявній нефакторизованій схемі другого порядку точності за часом і за простором, а також з підітераціями за псевдочасом.

В результаті проведеного комп'ютерного моделювання нестационарних процесів селективного лазерного плавлення металевих порошків отримано розподіл поля температури в розрахунковій області з виділенням зони ліквідусу (рис. 1). Побудовано залежності ширини та глибини ванни розплаву від швидкості руху лазера та діаметру лазерної плями (рис. 2, 3). Отримані результати задовільно збігаються з експериментальними даними.

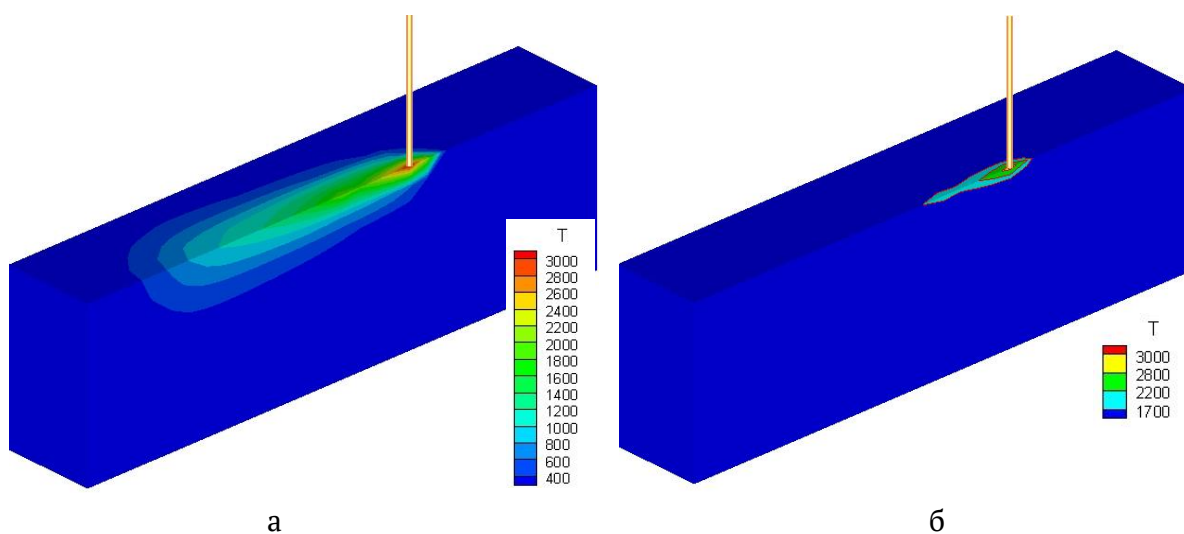


Рисунок 1 - Розподіл температури в розрахунковій області (а)  
з виділенням зони ліквідусу (б)

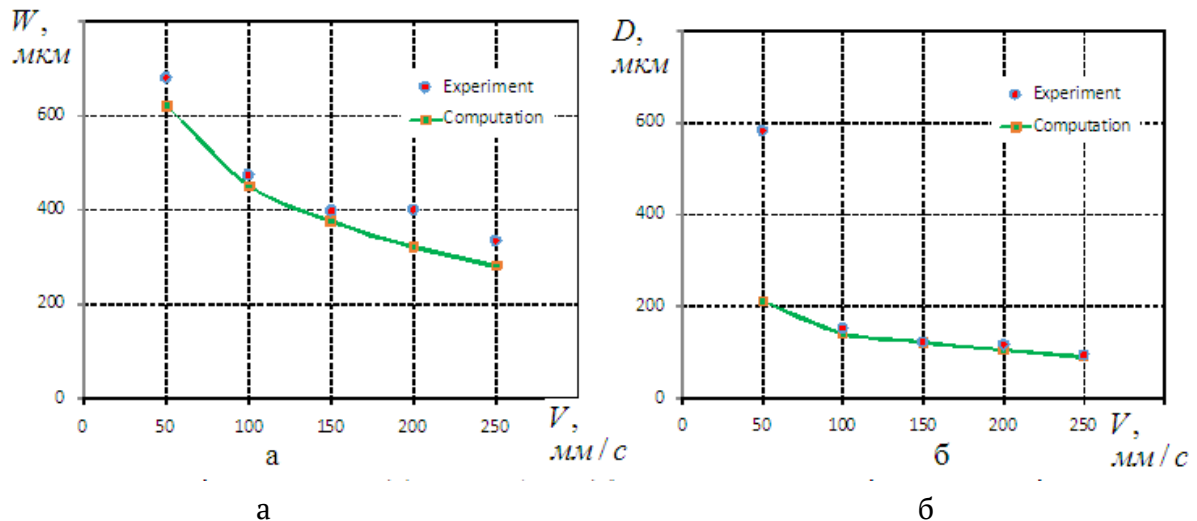


Рисунок 2 - Залежність ширини (а) та глибини (б) ванни розплаву від швидкості руху лазера (потужність лазера  $P = 400$  Вт, діаметр лазерної плями  $d = 205$  мкм)

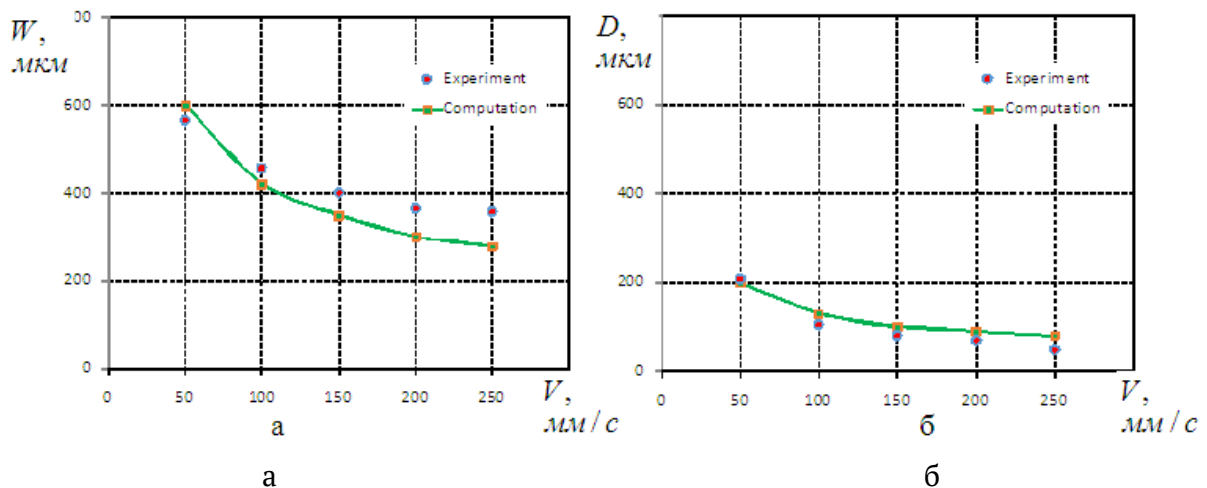


Рисунок 3 - Залежність ширини (а) та глибини (б) ванни розплаву від швидкості руху лазера (потужність лазера  $P = 400$  Вт, діаметр лазерної плями  $d = 262$  мкм)

## NUMERICAL SIMULATION OF UNSTEADY PROCESSES OF SELECTIVE LASER MELTING OF METAL POWDERS

Dovgii Stanislav, Dovgii Bohdan, Kopyka Oleg,  
Moiseienko Svitlana, Redchyts Dmytro, Tuchyna Ulyana

**Abstract.** Mathematical modeling of non-stationary processes of selective laser melting of metal powders is considered. The general mathematical formulation of the problem of selective laser melting of metal powders is reduced to the formulation of separate structurally interconnected problems. Such as: the problem of non-stationary heat transfer taking into account phase transitions when heating metal powders with a moving laser beam; the problem of the dynamics of liquid metal in a molten bath; the task of determining the non-stationary shape of the free

surface of the melt bath in the presence of recoil pressure. As a result of the carried out computer modeling, the distribution of the temperature field in the calculation area with the selection of the liquid zone was obtained. The dependences of the width and depth of the melt bath on the laser movement speed and the laser spot diameter are plotted.

**Keywords:** Numerical simulation, selective laser melting, numerical methods, metal powders