

# ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.791.92

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/01>**Бернацький А.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Соколовський М.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Сіора О.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Бондарєва В.І.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Шамсутдінова Н.О.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

## МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТОНКОСТІННИХ СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ВИРОБІВ АЕРОКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

При розробці наукових основ і технологічних прийомів лазерного зварювання багатокомпонентних жароміцних сплавів для виробів аерокосмічної техніки повстало завдання моделювання теплових процесів, що виникають при лазерному зварюванні тонкостінних стикових таких сплавів, оскільки фізика протікання процесу зварювання тонкостінних металів кардинально відрізняється від такої в напівбескінечному тілі. Моделювання даних процесів – вкрай складний процес через велику кількість динамічних параметрів, що необхідно обирати індивідуально для кожної конфігурації оброблюваних поверхонь, тому було обрано ряд певних вимог і умовностей, що дають можливість обрахувати дану модель без помилок. Для вирішення цієї проблеми було проведено аналіз світового досвіду моделювання методом скінченних елементів, що показав необхідність виведення серії вимог та умовностей до математичної моделі процесу лазерного зварювання. В результаті було отримано модель зварного з'єднання з повним проваром всієї товщини зварюваних пластин з широким зварним швом та зоною термічного впливу. При розрахунку процесів лазерної обробки важливо врахувати багато факторів, такі як термодинамічний вплив на розміщення рідкої фази у ванні розплаву тощо. При моделюванні лазерної обробки сплаву в напівбескінечному тілі було помічено, що більшість проплавлення матеріалу відбувається через 0,1-0,2с після передачі енергії лазерним випромінюванням. Тонкі пластини зі сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr (F-48), в силу своїх термодинамічних властивостей, (таких як висока початкова швидкість охолодження в 1,2-1,3 с), можуть бути зварені обраними режимами лазерної обробки. При цьому необхідно зазначити, що якість зварного з'єднання в даному випадку повинна забезпечуватись комплексом допоміжних виробничих заходів, спрямованих на запобігання браку деталі, що зварюється.

**Ключові слова:** математичне моделювання, метод скінченних елементів, лазерне зварювання, тонкостінні стикові з'єднання, жароміцні сплави.

**Постановка проблеми.** Математичне моделювання за допомогою сучасних програмних пакетів – систем автоматичного проектування (САПР) – більш сучасний, точний і візуально зро-

зумілий метод моделювання в порівнянні з класичними розрахунковими методами моделювання фізичних процесів зварювання. Завдання математичного моделювання теплових процесів, що

виникають при лазерному зварюванні тонкостінних стикових з'єднань багатокомпонентних жароміцних сплавів для виробів аерокосмічної техніки є актуальним з причини кардинальної різниці між загальновідомою фізикою протікання процесу зварювання тонкостінних металів від такої у напівбескінечному тілі з безкінечною глибиною, розрахунок якої є вже вирішеним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Після аналізу світового досвіду з моделювання процесів зварювання близьких матеріалів та конструкцій [1-3] було встановлено, що створення абсолютно точної моделі процесу лазерного зварювання тонкостінного стикового з'єднання є невідповідним у практичних застосуваннях через надвисоку комплексність такої моделі, що встановлює непомірно високі вимоги до розрахункового комп'ютера, а також потребує великої кількості часу для розрахування лічених секунд процесу зварювання. Через це було виведено ряд вимог та умовностей [4], що дозволять створити задовільну модель процесу зварювання тонкостінних деталей, виготовлених з багатокомпонентних жароміцних сплавів. Моделі теплового обміну, створені для цього розрахунку, повинні бути виконані з виконанням певних вимог:

1. Урахування температури кипіння, коефіцієнту відбиття та теплоти випаровування.
2. Урахування нелінійності характеристик матеріалу при розрахунку теплового поля.
3. Урахувати нелінійний зв'язок втрат тепла як головної причини встановлення квазірівноваги у зварювальній ванні.

При цьому, обрано певні умовності для спрощення розрахунку:

1. Модель не враховує деформацію поверхні твердої та рідкої фаз;
2. Не враховується рух рідкого розплаву та перевідбиття лазерного пучка всередині каналу проплавлення.
3. Момент створення ванни розплаву у вигляді каналу проплавлення та парогазового каналу враховується лише частково.

Аналіз різних статей, що оцінюють можливості комплексів САПР, вказують на перевагу пакету САПР COMSOL Multiphysics [1, 3, 5], оскільки даний програмний пакет має широкі можливості для постановки точних умов задачі та дуже великого потенціалу в плані моделювання процесів зварювання, як типових, так і спеціалізованих матеріалів. Моделі враховують нерівномірний рух в початку і кінці зварювального процесу, Гаусівський розподіл теплового потоку по радіусу

лазерної плями та коефіцієнт відбиття, що залежить від температури.

Моделювання процесу зварювання проводили для сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr, також відомого як сплав F-48. F-48 – жароміцний ніобієвий сплав, що використовується при виготовленні деталей турбін, реактивних двигунів та атомних реакторів [6-8]. Виготовляються деталі з цього металу частіше за все методами порошкової металургії. Основний робочий діапазон температур для цього сплаву лежить в рамках 800–1400°C. Температура плавлення сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr – 2540°C. Хімічний склад даного сплаву наведено в табл. 1.

Таблиця 1  
Склад сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr.

Елемент	Nb	W	Mo	Zr	C
Масова доля (%)	основа	14,95- 15,2	4,92- 5,07	0,93- 0,98	~0,1

**Постановка завдання.** Метою роботи є моделювання теплових процесів, що виникають при лазерному зварюванні тонкостінних стикових з'єднань сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr при потужності лазерного випромінювання у 400 Вт, а також проведення аналізу теплообміну стикового з'єднання пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr та виведення закономірностей теплової складової за допомогою пакету САПР COMSOL Multiphysics.

**Виклад основного матеріалу.** Моделі було виконано з допомогою фізичного модулю Heat Transfer in Solids (ht) комплексу САПР COMSOL Multiphysics 5.6.0.149. Даний модуль проводить розрахунок теплових процесів при лазерному випромінюванні за математичною моделлю, що базується на законі Стефана-Больцмана, а саме за рівнянням (1):

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u}_{trans} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (\mathbf{q} + \mathbf{q}_r) = -\alpha T : \frac{dS}{dt} + Q \quad (1),$$

де:

- $\rho$  – щільність [кг/м<sup>3</sup>]
- $C_p$  – питома теплоємність при постійному напруженні [Дж/(кг\*К)]
- $T$  – абсолютна температура [К]
- $\mathbf{u}_{trans}$  – вектор швидкості поступального руху [м/с]
- $\mathbf{q}$  – тепловий потік за провідністю [Вт/м<sup>2</sup>]
- $\mathbf{q}_r$  – тепловий потік випромінювання [Вт/м<sup>2</sup>]
- $\alpha$  – коефіцієнт теплового розширення [1/К]
- $S$  – другий тензор напруг Піоли-Кірхгофа [Па]
- $Q$  – додаткові джерела тепла [Вт/м<sup>3</sup>]

Тепловий слід данного процесу ( $Q_1$ ) розраховано з допомогою формули (2), яка враховує Гаусівський розподіл енергії:

$$Q_1 = \text{Laser\_power} * (1 - R_c) * 1 / (\pi * \text{beam\_radius\_x}^2) * \text{Gauss2D}(x, x_0) \quad (2)$$

Параметри режимів обробки, що використовувались в даних експериментах наведено у табл. 2.

Сама модель являє собою дві пластини тіло, яке змодельовано з допомогою крайніх значень (constraints) Thermal Insulation та Heat Flux. Область, що розраховується – дві пластини з габаритами 50×20×0.8 мм. Лазерне випромінювання проходить по стику двох пластин з однорідною швидкістю 300 мм/хв. Газовий захист – відсутній. Для уточнення результатів розрахункова сітка була покращена (Refined) в зоні стику двох пластин. Геометрія моделі представлена на рис. 1.

Таблиця 2

**Характеристики модулю Heat Transfer in Solids.**

Позначення	Величина	Характеристика
x0	"0 [mm]"	"pulse center x coordinate"
y0	"0 [mm]"	"pulse center y coordinate"
beam_radius_x	51[μm]	"Laser beam radius x direction"
beam_radius_y	51[μm]	"Laser beam radius y direction"
Laser_power	400[W]	"Laser beam total power"
Rc	0.3	"Laser beam reflection coefficient"
Width	50 [mm]	Width
Height	20[mm]	Height
v	300 [mm/min]	"Laser beam travel speed" (швидкість зварювання)
Thickness	0.8 [mm]	Thickness
r_spot	51[μm]	"Laser beam radius"

Очікується отримання моделі теплового розрахунку конвективного типу з рівномірним роз-

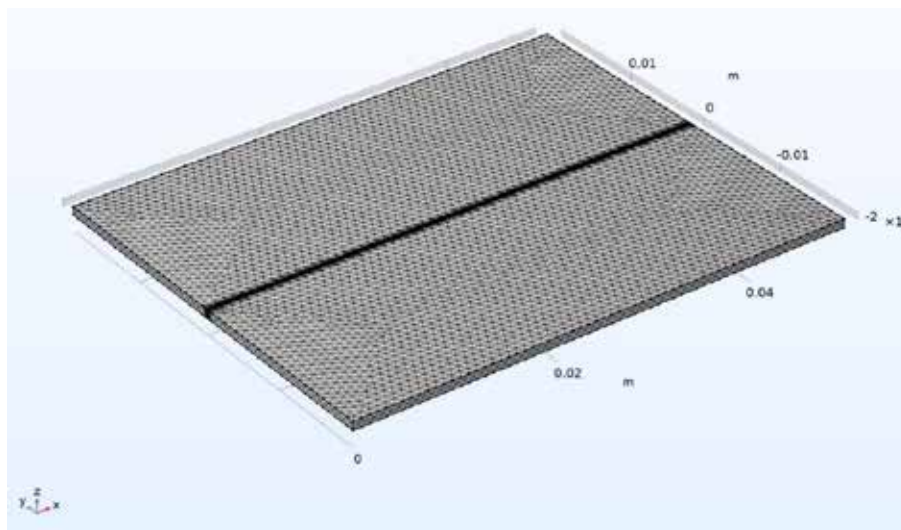
поділом теплової енергії. Гаусівський розподіл енергії дотримується по всій площині поверхні, температура на поверхні перевищує температуру плавлення матеріалу. При цьому відомо, що отримані двовимірні форми ванни розплавів не будуть точно співпадати з експериментальними через обрані умовності в розрахунку, оскільки вони не враховують фізичних явищ, які сильно впливають на форму ванни розплаву та, внаслідок цього – зварного шва.

При лазерній обробці сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr (F-48) в напівбескінечному тілі було помічено, що більшість проплавлення матеріалу відбувається через 0,1-0,2с після передачі енергії лазерним випромінюванням. Це явно помітно на рис. 2, який показує зріз торця розрахункової зони під час проходження ЛВ через його площину. При цьому даний сплав має яскраво виражену схему конвективного теплообміну, розповсюджуючи теплову енергію горизонтально на 1,1-1,2 мм в обидві сторони, забезпечуючи повний проплав пластини.

В даному випадку температура поверхневих шарів матеріалу досягає матеріалу точки випаровування, підкреслюючи необхідність використання газового захисту.

Коротка довжина зони (як показано на рисунку 3), де температура матеріалу залишається вищою за температуру плавлення (близько 2,0-2,5 мм) – вказує на високу початкову швидкість охолодження сплаву без зовнішніх впливів. Це можна пояснити фізичним складом сплаву.

При цьому можна помітити досить довгу (приблизно 14,8 мм) зону, де температура матеріалу залишається вищою за температури робочого режиму даного сплаву (1500-2200°C), що вказує на швидке



**Рис. 1. Геометрія розрахункової моделі експерименту з нанесеною на неї розрахунковою сіткою**

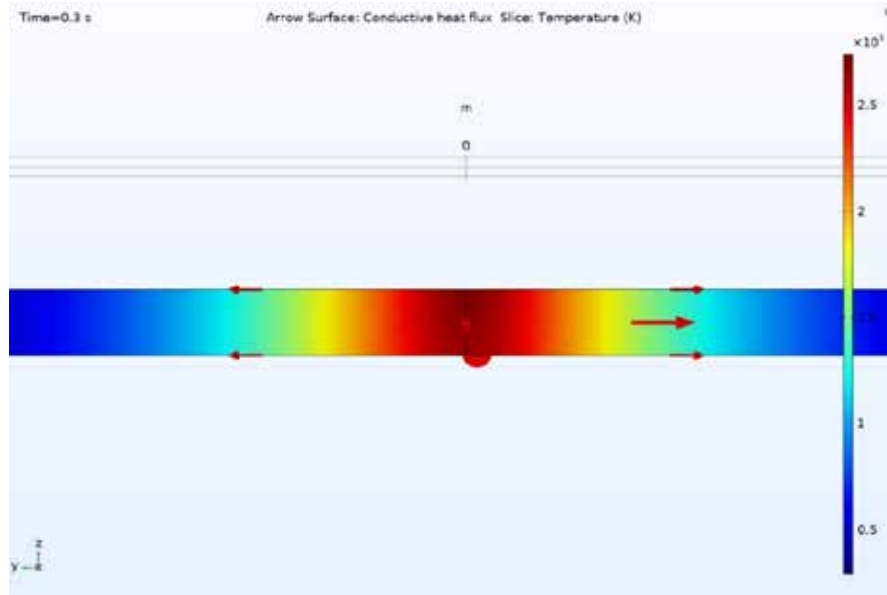


Рис. 2. Схема теплообміну при лазерному зварюванні пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт в площині YZ, момент часу 0,3 с

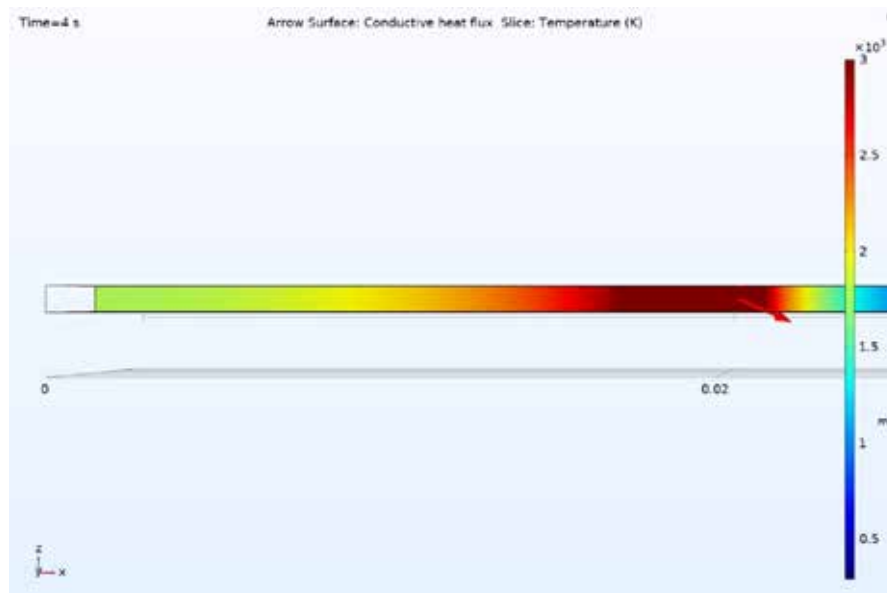


Рис. 3. Схема теплообміну в площині XZ при лазерному зварюванні пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт, момент часу 4 с

зниження швидкості охолодження після рекристалізації металу. Однорідність збереження конвективної природи термодинамічної взаємодії процесів при цьому зберігається. При обраних режимах обробки було помічено повний проплав точок тонких пластин через 0-0,1 с після прикладення до даних точок лазерного випромінювання. Більш явна картина в горизонтальній площині, яка спричинена дією лазерного випромінювання в сплаві Nb-15W-5Mo-1Zr, демонструється на рисунках 4 та 5.

Тут можна помітити, що приблизно 65% теплообміну (напрямок якого показано стрілками

на рисунках 4 та 5) відбувається безпосередньо поруч з зоною безпосередньої дії ЛВ. При цьому, через малу товщину матеріалу, основна частина поглинутої теплової енергії переходить в горизонтальну, а не вертикальну площину. Для прямого порівняння результатів розрахунків та даних про швидкість охолодження матеріалу, було сформульовано та наведено графіки температурного розподілу в глибину (рисунки 6 та 7).

Час застигання розплаву складає 1,25-1,3 с. При цьому швидкість охолодження різко знижується до величини  $u \sim 200$  °C/c за 1,4-1,7 секунди після засти-

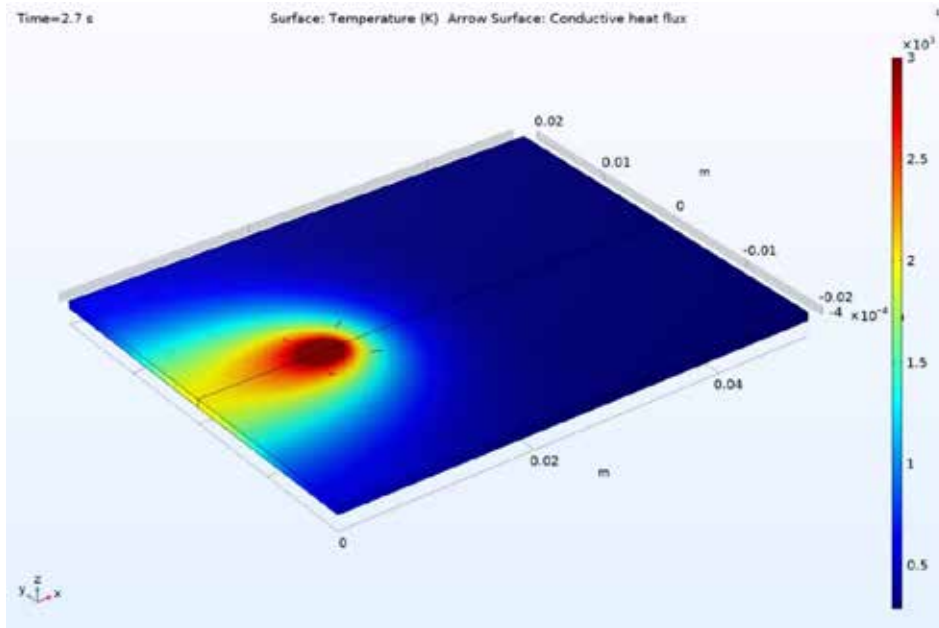


Рис. 4. Тривимірна схема теплообміну при лазерному зварюванні пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт, момент часу 2,7 с (верхня сторона)

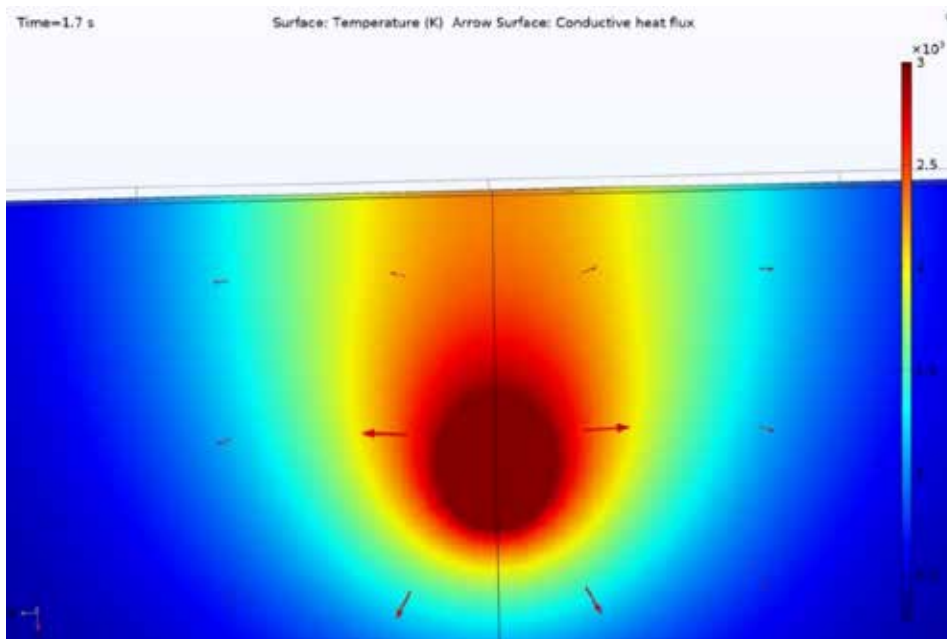


Рис. 5. Тривимірна схема теплообміну при лазерному зварюванні пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт, момент часу 2,7 с (нижня сторона)

гання матеріалу. Після цього швидкість охолодження матеріалу знижується ще більше, підкреслюючи необхідність забезпечення охолодження. Наостанок, для виявлення відмінностей у динаміці теплового процесу, було проведено аналіз ізотермічних контурів теплообмінного процесу, що наведено на рис. 8.

При зварюванні стикових з'єднань тонко-стінних пластин з даного матеріалу утворюється

еліпсоподібна ванна розплаву з видовженням у 4,0-5,6 мм та шириною в 2,1-2,3 мм.

Аналіз термодинамічної взаємодії тонких пластин зі сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr показав серію залежностей, а саме:

1. При розрахунку процесів лазерної обробки важливо врахувати багато факторів, такі як термодинамічний вплив на розміщення рідкої фази у ванні розплаву тощо.

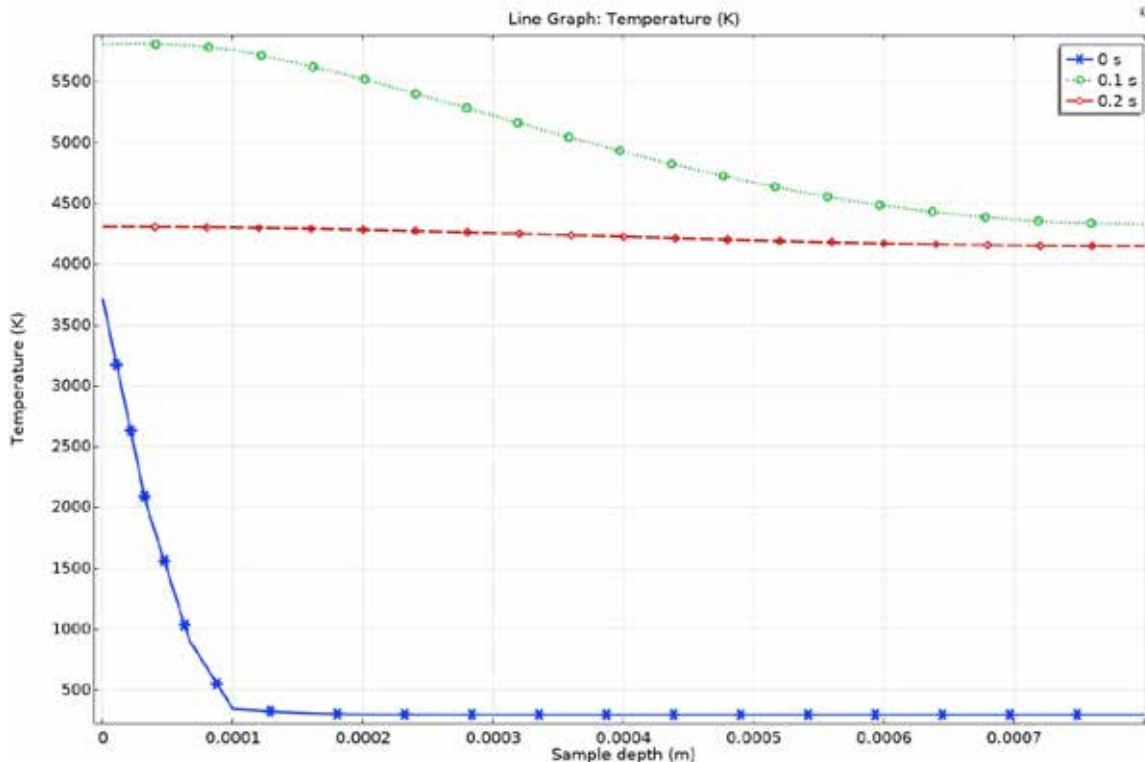


Рис. 6. Графік розподілу температур по площині XZ при лазерному зварюванні пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт

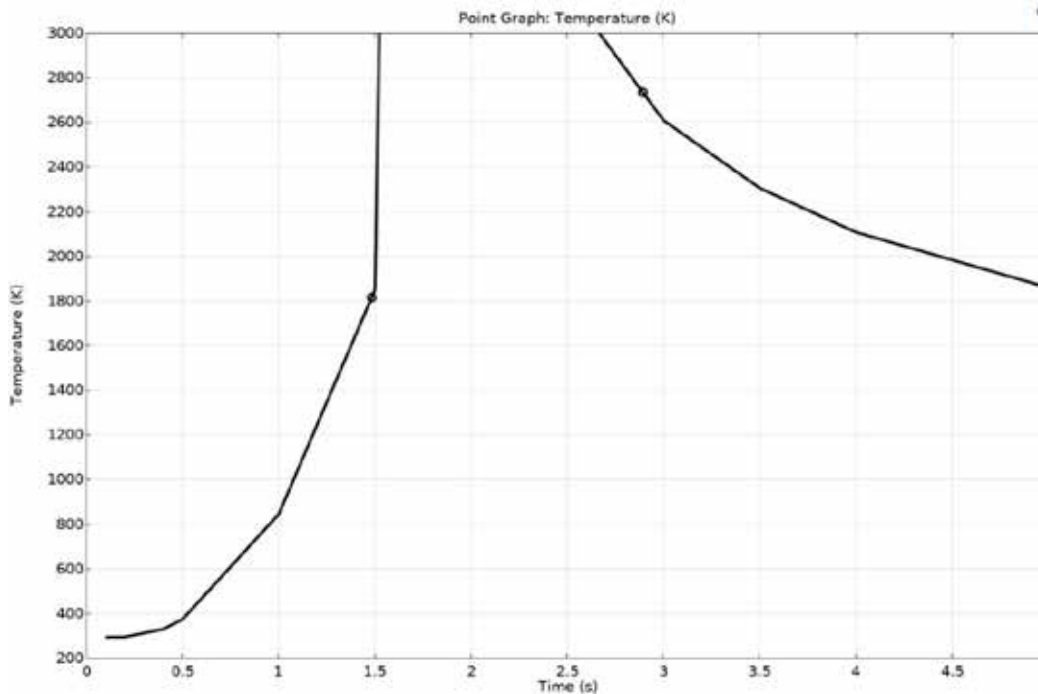


Рис. 7. Графік розподілу температур на поверхні пластини на відстані 10 мм від торця під час лазерного зварювання пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт

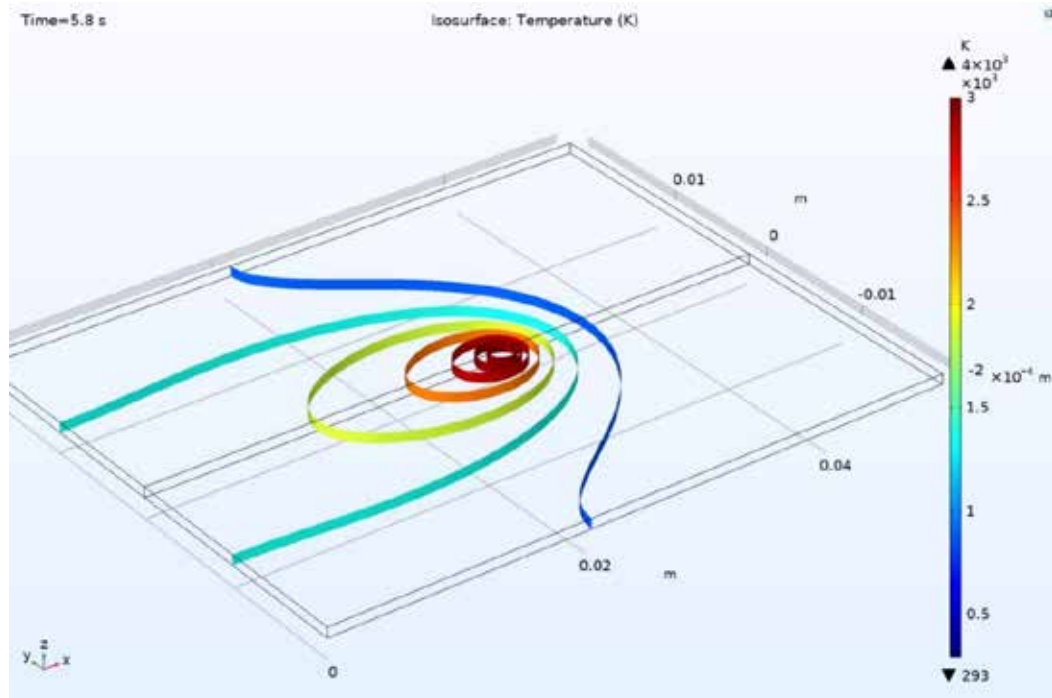


Рис. 8. Ізотермічний контур моментальної ванни розплаву при лазерному зварюванні пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт, момент часу 5,8 с

2. Сплав Nb-15W-5Mo-1Zr досить важко оброблюється шляхом лазерної обробки завдяки жароміцному складу, при цьому маючи вищу швидкість охолодження та відносно рівномірний розподіл температур у трьох площинах.

**Висновки.** Моделювання теплових процесів, що виникають при лазерному зварюванні тонкостінних стикових з'єднань багатокомпонентних жароміцних сплавів – вкрай складний процес через велику кількість динамічних параметрів, що необхідно обирати індивідуально для кожної конфігурації оброблюваних поверхонь. Для забезпечення виконання поставленого завдання було виконано аналіз теплових процесів, а також було створено модель стикового з'єднання тонких пластин з багатокомпонентних металів. В резуль-

таті було отримано модель зварного з'єднання з повним проваром всієї товщини зварюваних пластин з широким зварним швом та зоною термічного впливу.

З результатів моделювання термодинамічної взаємодії даного сплаву при лазерній обробці можна досить впевнено сказати, що обрані режими обробки дають можливість провести лазерне зварювання плит товщиною 0,8-1,2 мм без серйозних змін до характеристик лазерного випромінювання. При цьому висока швидкість охолодження, а також широка ванна розплаву вказує на необхідність проведення достатнього контролю над якістю шляхом захисту зони термічного впливу та використання комплексних технологічних заходів.

#### Список літератури:

1. A.P. Mackwood, R.C. Crafer. Thermal modelling of laser welding and related processes: a literature review. *Optics & Laser Technology*. 2005. № 35. С. 99–115.
2. Mickael Courtois, Muriel Carin, Philippe LeMasson, Sadok Gaied, and Mikhaël Balabane. A New Approach to Compute Multi – Reflections of Laser Beam in a Keyhole for Heat Transfer and Fluid Flow Modelling in Laser Welding. *Journal of Physics. Applied Physics*. 2013. №50. С. 505305.
3. Lei Wang, Yong Huang, Dongqing Yang, He Li, Yong Peng, Kehong Wang. Multi – scale simulation of grain growth during laser beam welding of nickel – based superalloy. *Journal of Materials Research and Technology, Volume 9*. 2020. № 6. С. 15034–15044.
4. Gusarov, A.V., I. Yadroitsev, Ph. Bertrand, and I. Smurov. Heat Transfer Modelling and Stability Analysis of Selective Laser Melting. *Applied Surface Science*. 2007. № 254. С. 975–979.

5. Mayi Y.A., Dal M., Peyre P., Bellet M., Metton C., Moriconi C., Fabbro R. An Original Way of Using COMSOL® Application Builder to Enhance Multiphysical Simulation of Laser Welding Processes. *COMSOL Technical Papers and Presentations*. 2020. URL: [https://www.comsol.com/paper/download/855071/Mayi\\_paper.pdf](https://www.comsol.com/paper/download/855071/Mayi_paper.pdf)
6. Miracle, D.B.; Senkov, O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017. №122. C. 448–511.
7. Ghosh P.S., Sen A., Chattopadhyaya S., Sharma S., Singh J., Dwivedi S.P., Saxena A., Khan A.M., Pimenov D.Y., Giasin K. Prediction of Transient Temperature Distributions for Laser Welding of Dissimilar Metals. *Applied Sciences*. 2021. № 11(13). C. 5829.
8. Miracle, D.B.; Miller, J.D.; Senkov, O.N.; Woodward, C.; Uchic, M.D.; Tiley, J. Exploration and Development of High Entropy Alloys for Structural Applications. *Entropy*. 2014. №16. C. 494–525.

**Bernatskyi A.V., Sokolovskyi M.V., Siora O.V., Bondarieva V.I., Shamsutdinova N.O.**  
**SIMULATION OF THERMAL PROCESSES OCCURRING DURING LASER WELDING OF THIN-WALLED BUTT JOINTS OF MULTICOMPONENT HEAT-RESISTANT SUPERALLOYS FOR AEROSPACE APPLICATIONS**

*During the development of scientific foundations and technological methods of laser welding of multicomponent superalloys for aerospace applications, the task of modeling for thermal processes that occur during laser welding of butt joints for aerospace products arose. This is the case since the physics of the welding process of thin-walled metals are fundamentally different from that in a semi-infinite body with infinite thickness. Modeling these processes is an extremely complex process due to the large number of dynamic parameters that must be individually selected for each configuration of the treated surfaces, therefore a number of certain requirements and conventions were chosen, which make it possible to calculate this model without errors. To solve this problem, an analysis of the global experience of modeling by the finite element method was carried out, which showed the need to select a series of requirements and simplifications for the mathematical model of the laser welding process. As a result, a model of a full penetration welded joint with a wide weld seam and a heat-affected zone was obtained. When calculating laser processing processes, it is important to take into account many factors, such as the thermodynamic effect on the placement of the liquid phase in the melt bath, etc. When modeling the laser processing of an alloy in a semi-infinite body, it was observed that most of the melting of the material occurs after 0.1-0.2s after the transfer of laser radiation energy. Thin plates made of Nb-15W-5Mo-1Zr (F-48) alloy, due to their thermodynamic properties (such as a high initial cooling rate of 1.2-1.3 s), can be welded by selected laser processing modes. At the same time, it should be noted that the quality of the weld in this case must be ensured via employment of an auxiliary production processes set aimed at preventing the failure of the welded part.*

**Key words:** *mathematical modeling, finite element method, laser welding, thin-walled butt joints, superalloys.*