

Vitalii V. Manko
Манько Віталій Володимирович

УДК 629.5.035; 621.791

PRE-EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF DEPOSITION PATH FOR WIRE-ARC ADDITIVE MANUFACTURING OF PROPELLER BLADES

ПЕРЕДЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ТРАЄКТОРІЇ НАПЛАВЛЕННЯ ДЛЯ ДРОТОВО-ДУГОВОГО АДИТИВНОГО ВИГОТОВЛЕННЯ ЛОПАТЕЙ ГРЕБНОГО ҐВИНТА

DOI https://doi.org/10.15589/smi2026.2(23).01

Vitalii V. Manko Манько Віталій Володимирович, аспір.
mankovit48@gmail.com
ORCID: 0009-0006-3554-7374

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. ***Aim.*** To develop a pre-experimental approach for validating and refining deposition paths for wire arc additive manufacturing by cold metal transfer when producing hollow cellular propeller-blade elements using transient thermal simulation.

Methods. An iterative "design-technology" procedure was used to link strength, shell-stability, modal-response, and internal-surface-machinability requirements with deposition-path constraints. Start and stop locations were assigned to low-stress regions identified by finite element analysis. A three-dimensional transient thermal model was implemented in ANSYS Parametric Design Language with material activation, a Goldak double-ellipsoidal heat source, convective and radiative heat losses, and step-averaged pulsed heat input. Convergence was assessed for time steps of Δt = 0,01/0,005 s and print-zone mesh size h = 1/0,75/0,5 mm; Δt = 0,01 s and h = 1 mm were adopted for engineering studies. Integral quality indices from temperature histories were introduced: overheating above the liquidus (I_{over}), a solidification-risk index in the solidus-liquidus range during cooling (I_{solid}), and residence time above the solidus (I_{fusion}).

Results. Analysis of the index fields and area statistics made it possible to localize regions of repeated heating, uneven thermal coverage, and insufficient interaction between adjacent passes. The obtained distributions showed that the selected path requires local correction and, where necessary, adjustment of cooling pauses or process parameters before the first specimen is manufactured.

Scientific novelty. A set of physically motivated cumulative thermal indices was integrated with path assessment in a three-dimensional transient model of cold metal transfer deposition for hollow cellular propeller blades.

Practical significance. The proposed procedure enables unsuitable path fragments to be detected before experimental deposition, thereby reducing the number of trial iterations and improving the probability of stable bead formation and acceptable solidification conditions.

Key words: cold metal transfer; transient thermal simulation; Goldak heat source; material activation; cumulative thermal indices; solidification conditions; nickel-aluminum bronze; cellular structure.

Анотація. ***Мета.*** Розробити підхід до передекспериментальної перевірки та коригування траєкторій наплавлення під час дротово-дугового адитивного виготовлення з керованим перенесенням металу для елементів лопаті гребного ґвинта з порожнистою комірчастою структурою на основі нестаціонарного теплового моделювання.

Методика. Використано ітераційну процедуру конструкція – технологія, що узгоджує вимоги міцності, стійкості оболонки, модальних характеристик і оброблюваності внутрішніх поверхонь з обмеженнями траєкторії наплавлення. Місця початку і завершення проходів розташовували в зонах низьких напружень, визначених методом скінченних елементів. У мові параметричного проєктування ANSYS реалізовано тривимірну нестаціонарну теплову модель з активацією матеріалу, двоеліпсоїдним джерелом тепла Голдака, конвективними та радіаційними тепловтратами й покроковим усередненням імпульсного тепловкладення. Збіжність оцінювали для кроків часу Δt = 0,01/0,005 с та розмірів сітки в зоні друку h = 1/0,75/0,5 мм; як робочі прийнято Δt = 0,01 с і h = 1 мм. За температурними історіями введено інтегральні індекси якості: перегріву вище ліквідусу (I_{over}), ризику тверднення в інтервалі солідус – ліквідус на охолодженні (I_{solid}) та часу перебування вище солідусу (I_{fusion}).

Результати. Аналіз полів індексів і статистичних показників розрахункової області дав змогу локалізувати зони повторного нагріву, нерівномірного розподілу тепловкладення та недостатньої взаємодії між суміжними проходами. Отримані розподіли показали, що прийнята траєкторія потребує локального коригування, а за необхідності – зміни тривалості пауз охолодження або параметрів процесу до виготовлення першого зразка.

Наукова новизна. Набір фізично обґрунтованих накопичувальних теплових індексів інтегровано з оцінюванням траєкторії у тривимірній нестаціонарній моделі наплавлення з керованим перенесенням металу для порожнистих комірчастих лопатей гребних ґвинтів.

Практична значимість. Запропонована процедура дає змогу виявляти неприйнятні фрагменти траєкторії до експериментального наплавлення, зменшувати кількість пробних ітерацій і підвищувати ймовірність стабільного формування валиків і прийнятних умов твердnення.

Ключові слова: кероване перенесення металу; нестаціонарне термічне моделювання; джерело тепла Голдака; активація матеріалу; накопичувальні теплові індекси; умови твердnення; нікель-алюмінієва бронза; комірчаста структура.

References

[1] Kesarwani, S., Yuvaraj, N., & Niranjan, M.S. (2025). CMT-based WAAM: A comprehensive review of process parameters, their effects, challenges, and future scope. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 47*(1), Article 11. https://doi.org/10.1007/s40430-024-05276-0

[2] Queguineur, A., Rückert, G., Cortial, F., & Hascoët, J.-Y. (2018). Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications. *Welding in the World, 62*(2), 259–266. https://doi.org/10.1007/s40194-017-0536-8

[3] Biegler, M., Wang, J., Kaiser, L., & Rethmeier, M. (2020). Automated tool-path generation for rapid manufacturing of additive manufacturing directed energy deposition geometries. *Steel Research International, 91*(10), Article 2000017. https://doi.org/10.1002/srin.202000017

[4] Cambon, C., Rouquette, S., Bendaoud, I., Bordreuil, C., Wimpory, R., & Soulié, F. (2020). Thermo-mechanical simulation of overlaid layers made with wire + arc additive manufacturing and GMAW – cold metal transfer. *Welding in the World, 64*(8), 1427–1435. https://doi.org/10.1007/s40194-020-00951-x

[5] Chen, Z., Yuan, L., Pan, Z., Zhu, H., Ma, N., Ding, D., & Li, H. (2025). A comprehensive review and future perspectives of simulation approaches in wire arc additive manufacturing (WAAM). *International Journal of Extreme Manufacturing, 7*(2), Article 022016. https://doi.org/10.1088/2631-7990/ada380

[6] Barath Kumar, M. D., & Manikandan, M. (2022). Assessment of process parameters, residual stress mitigation, post treatments and finite element analysis simulations of wire arc additive manufacturing technique. *Metals and Materials International, 28*(1), 54–111. https://doi.org/10.1007/s12540-021-01015-5

[7] Graf, M., Hälsig, A., Höfer, K., Awiszus, B., & Mayr, P. (2018). Thermo-mechanical modelling of wire-arc additive manufacturing (WAAM) of semi-finished products. *Metals, 8*(12), Article 1009. https://doi.org/10.3390/met8121009

[8] Montevecchi, F., Venturini, G., Scippa, A., & Campatelli, G. (2016). Finite element modelling of wire-arc additive manufacturing process. *Procedia CIRP, 55*, 109–114. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.024

[9] Orzolek, S. M., Semple, J. K., & Fisher, C. R. (2021). *Nickel-aluminum bronze (NAB) review: Additive manufacturing and weldability* (Technical Report No. NSWCCD-61-TR-2021/9). Naval Surface Warfare Center, Carderock Division.

[10] Carlton, J. S. (2019). *Marine propellers and propulsion* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.

[11] Shen, C., Mu, G., Hua, X., Li, F., Luo, D., Ji, X., & Zhang, C. (2019). Influences of postproduction heat treatments on the material anisotropy of nickel-aluminum bronze fabricated using wire-arc additive manufacturing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 103*(5–8), 3199–3209. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03700-7

[12] Lu, G.-X., Chen, T.-C., Shiue, R.-K., & Tsay, L.-W. (2025). Effects of surface modifications on rotating bending fatigue of Ni-Al bronze alloy. *Metals, 15*(1), Article 19. https://doi.org/10.3390/met15010019

[13] Roshan, M., Mahtabi, M. B., Ranjbar Eslamloo, S., Behvar, A., & Haghshenas, M. (2025). A review on fatigue characteristics of nickel-aluminum bronze (NAB): Conventionally fabricated and additively manufactured. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 48*(2), 389–417. https://doi.org/10.1111/ffe.14495

[14] Klötzer-Freese, C., Kruse, T., Khalil, M., & Greitsch, L. (2024). Hybrid manufacturing of a hollow ship's propeller: Investigation from material characterization to implementation. In K. Koushan & S. Steen (Chairs), *Proceedings of the Eighth International Symposium on Marine Propulsors (smp'24)* (pp. 737–745). https://doi.org/10.15480/882.9360

[15] Nota, C., Rückert, G., Heuzé, J. L., Carlino, L., Quenez, J.M., & Courregelongue, L. (2023). A first feedback on manufacturing and in-service behaviour of a WAAM-made propeller for naval application. *Welding in the World, 67*(5), 1281–1289. https://doi.org/10.1007/s40194-023-01475-w

[16] Sampaio, R. F. V., Pragana, J. P. M., Bragança, I. M. F., Silva, C. M. A., Nielsen, C. V., & Martins, P. A. F. (2023). Modelling of wire-arc additive manufacturing: A review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, 6*, Article 100121. https://doi.org/10.1016/j.aime.2023.100121

[17] Goldak, J., Chakravarti, A., & Bibby, M. (1984). A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical Transactions B, 15*(2), 299–305. https://doi.org/10.1007/BF02667333

[18] Manko, V.V. (2026). *3D thermal model of WAAM-CMT in ANSYS APDL for NAB* [Data set]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.20382878

Постановка завдання. Дротово-дугове адитивне виготовлення (далі – WAAM), зокрема методом керованого перенесення металу (далі – CMT), є перспективним способом створення великогабаритних суднових виробів [1; 2], зокрема й елементів лопатей гребних ґвинтів. Порожнисті комірчасті структури дають змогу зменшити масу й матеріаломісткість, однак їх технологічна реалізованість залежить від геометрії та послідовності проходів наплавлення.

Траєкторія визначає розподіл тепловкладення, локальні теплові цикли, повторні нагріви й умови твердіння в кутах комірок і зонах зближення проходів [3–5]. Нерівномірне накопичення тепла може спричиняти нестабільне формування валиків, геометричні відхилення та підвищення ризику дефектів.

Тому прийнята траєкторія потребує перевірки до виготовлення фізичного зразка на основі нестаціонарного теплового моделювання та інтегральних показників температурної історії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження WAAM охоплюють вплив параметрів процесу на геометрію валика, теплові цикли, структуру, залишкові напруження та дефектність виробів [1; 5; 6]. Метод CMT застосовують для тонкостінних і великогабаритних деталей завдяки зниженому тепловкладенню, однак накопичення тепла залишається чинником геометричної нестабільності.

Для прогнозування температурного стану використовують тривимірні нестаціонарні скінченноелементні моделі з рухомими джерелами тепла й активацією матеріалу [4;

7; 8]. Точність таких моделей залежить від параметрів джерела, теплофізичних властивостей, граничних умов і просторово-часової дискретизації [5; 16].

Дослідження траєкторій переважно спрямовані на геометричне заповнення шару, скорочення холостих переміщень і регулювання міжпрохідної температури [3–5]. Для замкнених комірчастих структур необхідно додатково враховувати зближення проходів, повторний нагрів, місця запалювання дуги й охолоджувальні паузи.

Застосування WAAM для суднових деталей і гребних ґвинтів підтверджене дослідженнями та промисловими демонстраціями [2; 14; 15]. Для нікель-алюмінієвої бронзи важливими є температурозалежні властивості, фазові перетворення, дефектність і втомні характеристики [9–11]. Підвищена шорсткість внутрішніх поверхонь також може знижувати втомну довговічність [12; 13], тому конструкція комірок має забезпечувати доступ для їх обробки.

Виокремлення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Для порожнистих комірчастих елементів лопатей залишається не досить розробленою процедура передекспериментальної перевірки та коригування траєкторії. Наявні підходи переважно використовують пікові температури, окремі теплові цикли або геометричні критерії, але не повною мірою враховують накопичувальний характер повторного нагріву і охолодження.

Неналежно формалізоване також узгодження міцності, стійкості, теплової стабільності й оброблюваності внутрішніх поверхонь. Отже, необхідний підхід конструкція – технологія, у якому траєкторія оцінюється за інтегральними показниками температурної історії, а результати використовуються для коригування проходів, пауз і параметрів процесу.

Мета дослідження. Метою дослідження є розроблення підходу до передекспериментальної перевірки та коригування траєкторії WAAM-CMT наплавлення елементів порожнистої комірчастої лопаті гребного ґвинта на основі нестаціонарного теплового моделювання та інтегральних індексів якості.

Методи дослідження. Числове термічне моделювання процесу WAAM-CMT у ANSYS APDL (3D нестаціонарна теплова задача з активацією матеріалу, моделлю джерела тепла й урахуванням імпульсів CMT), дослідження збіжності за кроком часу та розміром сітки, розрахунок інтегральних індексів якості за температурними історіями для перевірки прийнятої траєкторії.

Об’єктом дослідження є технологічний процес WAAM-CMT наплавлення шарів під час виготовлення елементів лопаті гребного ґвинта з порожнистими комірчастими структурами.

Предметом дослідження є вплив послідовності й напрямку проходів, місць їх початку і завершення, зближення суміжних проходів і охолоджувальних пауз на температурні цикли, перегрів та умови твердіння, а також їх оцінювання накопичувальними тепловими індексами.

Основна частина.

1. Конструктивні передумови формування траєкторії

Для порожнистих комірчастих лопатей гребних ґвинтів застосовано ітераційний підхід конструкція – технологія, у межах якого геометричні параметри зовнішньої оболонки та внутрішніх комірок узгоджують із результатами розрахунків міцності, стійкості й модальних характеристик, а також з технологічними обмеженнями WAAM [10; 14; 15]. Параметри комірчастої структури безпосередньо впливають на довжину, напрямок і послідовність проходів, локальне зближення траєкторій, розташування місць початку і завершення наплавлення і доступність внутрішніх поверхонь для подальшої обробки [3; 14].

На початковому етапі формують тривимірну модель лопаті із внутрішньою комірчастою структурою (рис. 1). Попередню товщину стінок приймають з урахуванням очікуваної ширини одиничного валика та можливості одно- або двопрохідного формування. Для розглянутої технологічної схеми як початковий інженерний діапазон використано товщину 6–8 мм для однопрохідних ділянок і 9–12 мм для двопрохідного формування з перекриттям. Геометрію пе-

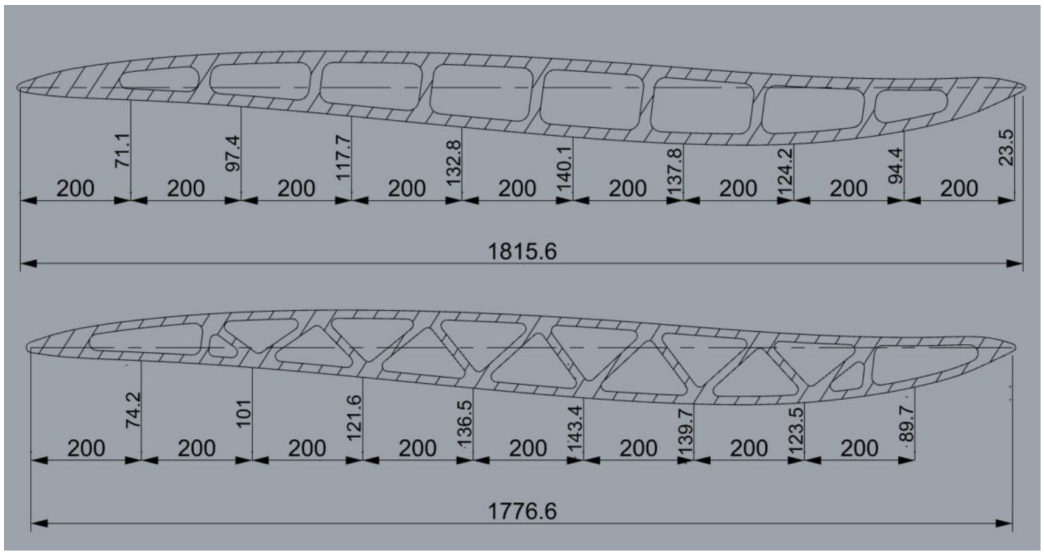
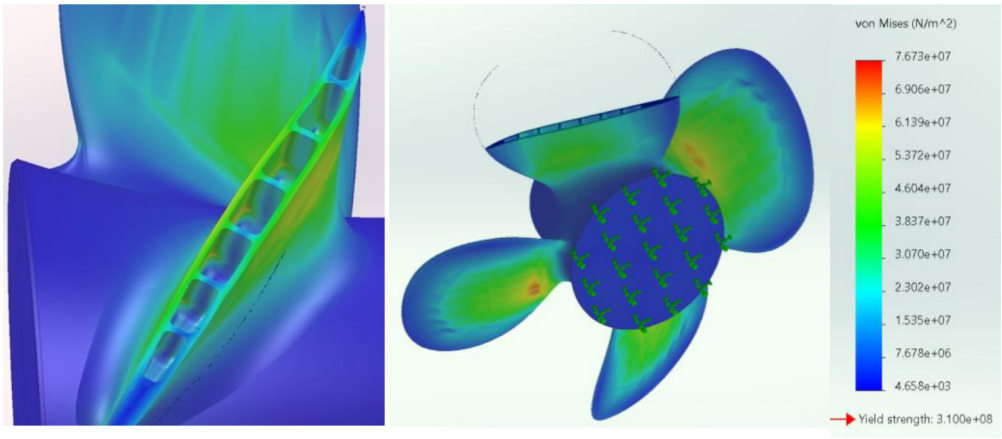


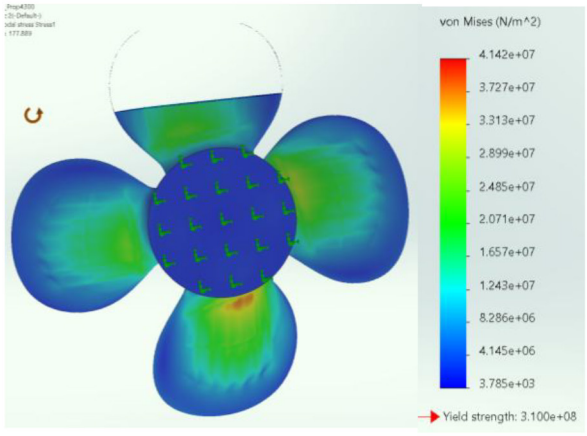
Рис. 1. Приклади профілю лопаті з комірчастою структурою

реходів між зовнішньою оболонкою і внутрішніми стінками формують без різких змін товщини й напрямку, що знижує концентрацію напружень і полегшує побудову безперервних проходів.

На конструктивному етапі виконується оцінювання напруженого стану лопаті під дією гідродинамічного навантаження та відцентрових сил. Поля тиску отримують за результатами CFD-моделювання течії в обертовій розрахунковій області, розташованій за корпусом судна, для умов руху на спокійній воді. На рисунку 2 наведено розподіл еквівалентних напружень за Мізе-



а



б

Рис. 2. Розподіл напружень за Мізесом у лопаті гребного ґвинта для режимів: а) 0 вуз.; б) 14 вуз.

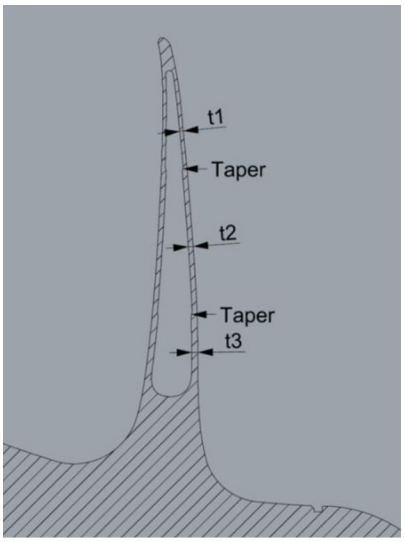


Рис. 3. Градієнтна конструкція перерізу лопаті

сом для двох розглянутих режимів роботи. Розрахунок проведено для гребного ґвинта діаметром D = 4,3 м за частоти обертання n = 155 об/хв і швидкостей судна 0 та 14 вуз. Густину морської води прийнято рівною 1 025 кг/м^3. Отримані поля тиску перенесено до статичної FEM-моделі лопаті з нікель-алюмінієвої бронзи, у якій кореневу частину жорстко закріплено та враховано дію відцентрових сил.

Внутрішні стінки комірок виконують функцію підкріплення зовнішньої оболонки та впливають на її локальну жорсткість. Як перспективний конструктивний варіант розглядається градієнтна комірчаста структура з підвищеною товщиною стінок у кореневій зоні та поступовим зменшенням матеріаломісткості в середній і кінцевій частинах лопаті. Більш масивну структуру передбачено в діапазоні 0,3–0,4R, а полегшені комірки – у діапазоні 0,4–0,9R, де R – радіус гребного ґвинта (рис. 3). Остаточні межі зон і товщини стінок мають визначатися за результатами розрахунків міцності, стійкості та технологічної перевірки траєкторії.

Для порожнистих комірчастих лопатей важливою є оброблюваність внутрішніх поверхонь, оскільки підвищена шорсткість може збільшувати локальну концентрацію напружень і знижувати втомну довговічність [12; 13]. Тому геометрія комірок і послідовність їх формування мають забезпечувати доступ інструменту до поверхонь, що потребують обробки, та не допускати передчасного закриття глибоких порожнин. За необхідності проміжну механічну обробку варто виконувати між окремими етапами наплавлення. Отже, конструктивно допустима структура потребує подальшої перевірки траєкторії щодо теплової стабільності, доступності поверхонь і послідовності закриття порожнин.

2. Постановка завдання перевірки траєкторії шару

Траєкторія шару задається послідовністю та напрямком проходів, місцями їх початку і завершення та переміщеннями без наплавлення (рис. 4). Її формують з урахуванням геометрії оболонки й комірок, а місця запалювання та гасіння дуги розташовують у низьконавантажених ділянках.

Перевірку виконують за полями накопичувальних теплових індексів, що характеризують перегрів, повторний нагрів і умови тверднення. Критичні ділянки усувають шляхом коригування проходів, охолоджувальних пауз або параметрів процесу.

3. Вихідні дані матеріалу NAB та врахування плавлення

Температурозалежні теплофізичні властивості нікель-алюмінієвої бронзи C63200 наведено в таблиці 1 (за [9]) і в моделі задаються в системі SI. Температури фазового інтервалу прийнято як T_{sol} = 1 334 K та T_{liq} = 1 359 K. За потреби властивості вище за верхню межу табличних даних продо-

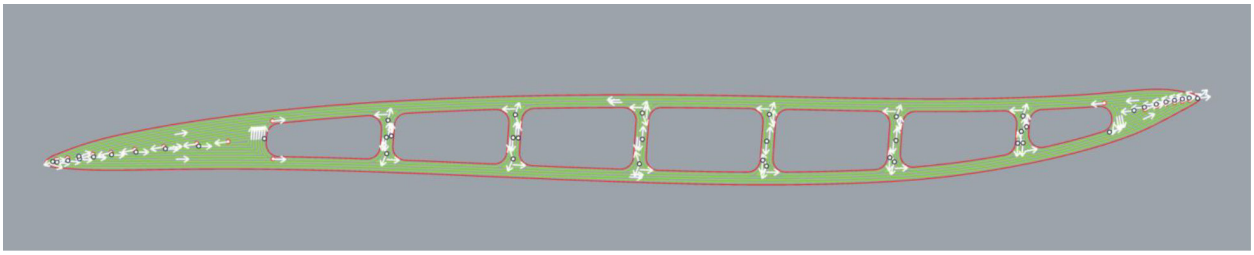


Рис. 4. Траєкторія побудови шару для перевірки

вжуються лінійною екстраполяцією як інженерне припущення, що потребує подальшої експериментальної перевірки.

Таблиця 1. Температурозалежні теплофізичні властивості бронзи C63200

T, К	ρ, кг/м^3	k, Вт/(м · К)	C_p, Дж/(кг · К)
273	7 550	37,2	418
293	7 529	36,4	429
473	7 459	51,1	454
673	7 374	70	519
873	7 278	77,7	575
1 073	7 166	88,5	822
1 173	7 046	71,1	810
1 273	6 945	60,7	714
1 333,9	6 940	60,2	663
1 334	6 940	60,2	663 + $C_{p,lat}$
1 359	6 900	54,5 · k_{boost}	620 + $C_{p,lat}$
1 359,1	6 900	54,5 · k_{boost}	620
1 370	6 850	54,5 · k_{boost}	610
1 473	6 800	54,5 · k_{boost}	550
1 673	6 700	54,5 · k_{boost}	500

Приховану теплоту плавлення $L_{lat} = 1{,}153 \cdot 10^5$ Дж/кг ураховано методом ефективної теплоємності. Для фазового інтервалу $\Delta T = T_{liq} - T_{sol} = 25$ К визначено додатковий складник теплоємності $C_{p,lat} = \dfrac{L_{lat}}{\Delta T} = 4612 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Значення $C_{p,lat}$ додано до базової теплоємності у граничних температурних точках фазового переходу $T_{sol} = 1\,334$ К та $T_{liq} = 1\,359$ К, у межах температурного інтервалу ефективна теплоємність визначається шляхом лінійної інтерполяції між заданими табличними значеннями. Підсилення теплопровідності в рідкій фазі $k_{boost} = 10$ – застосовується лише за умови $T \geq T_{liq}$.

4. Числова теплова модель WAAM-CMT в ANSYS APDL

4.1. Загальна постановка

Модель розв'язує завдання нестаціонарної теплопровідності у 3D з урахуванням тепловтрат (конвекція + випромінювання) та з моделюванням додавання матеріалу методом *element birth and death* [4; 7; 16]. Реалізація виконана в ANSYS APDL (Реалізований скрипт доступний у відкритому репозиторії [18]) з імпортом геометрії у форматі IGES через Workbench та з можливістю відновлення розрахунку з контрольної точки.

Елементи класифікуються за координатою Z щодо площини друку z_{print0}: нижче – підкладка, вище – друкована частина. Друкована частина на старті вимикається (EKILL) і надалі активується (EALIVE) уздовж траєкторії.

Для зон моделі задаються різні кроки сітки: у зоні друку – 1, 0,75, 0,5 мм, у підкладці – крупніша сітка (рис. 5).

4.2. Початкові та граничні умови теплообміну

У скрипті задано температуру довкілля $T_{amb} = 293$ К, а також приклад попереднього підігріву підкладки до $T_{preheat} = 473$ К. Тепловтрати з поверхні моделі враховано шляхом генерації поверхневих елементів SURF152 на вибраних гранях (компонент SURF_ELEM) з накладанням конвективного теплообміну та теплового випромінювання. Конвекція задається навантаженням типу CONV із коефіцієнтом $h_{conv} = 10 \dfrac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$, а випромінювання – через опцію SURF152

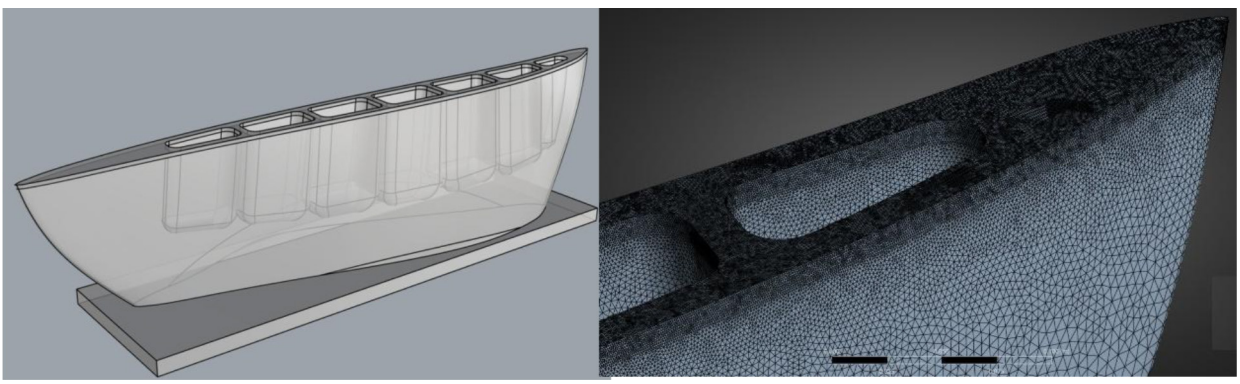


Рис. 5. Модель та сітка з кроком 1 мм для нового шару

з увімкненим режимом radiation, коефіцієнтом форми $F = 1$ (випромінювання у «велике середовище») та коефіцієнтом емісії поверхні $\varepsilon = 0{,}6$. Температуру середовища для випромінювання задають через «вузол середовища» n_{amb}, для якого фіксується $T(n_{amb}) = T_{amb}$. Площина закріплення за координатою z_{fix} виключається з поверхонь, на які накладаються втрати.

Тоді густини теплового потоку, що відводиться з поверхні, визначаються виразами:

$$q_{conv} = h_{conv}(T - T_{amb});$$

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma_{SB}F(T^4 - T_{amb}^4),$$

де q_{conv} і q_{rad} – відповідно конвективний і випромінювальний складники густини теплового потоку,

σ_{SB} – стала Стефана – Больцмана.

4.3. Джерело тепла та зв'язок з параметрами процесу

Ефективна теплова потужність задається як:

$$Q_{eff} = \eta UI,$$

де U– напруга дуги,

I– струм,

η – коефіцієнт ефективності теплопередачі.

У скрипті наведено приклад параметрів: $U_{arc} = 16$ V, $I_{arc} = 185$ A, $\eta = 0{,}8$, швидкість переміщення $V_{travel} = 0{,}005$ м/с.

Просторовий розподіл тепловкладення реалізовано двоеліпсоїдним джерелом Голдака з напівосями a, b, c_f, c_r та частками потужності f_f, f_r (з умовою $f_f + f_r = 2$) [17]. У прикладі налаштувань: $a_g = 4$ мм, $b_g = 7$ мм, $c_f = 4$ мм, $c_r = 8$ мм, $f_f = 0{,}6$, $f_r = 1{,}4$ (рис. 6) [4; 7; 16]. Параметри Голдака підлягають подальшому калібруванню за температурними циклами та геометрією валика.

4.4. Усереднення тепловкладення

Для CMT у моделі передбачено імпульсний закон потужності із частотою f_{cmt} і коефіцієнтом заповнення *duty*. Ключовою є опція $cmt_{mode} = 2$, яка коректно обчислює середнє тепловкладення на кроці інтегрування, уникаючи аліасингу.

4.5. Задання траєкторії

Траєкторія задається масивом точок (x, y, z), що зчитується з текстового файлу. Точка (0, 0, 0,) використовувалася як маркер переміщення без наплавлення: теплове навантаження вимикалось, після чого джерело переходило до наступного друкованого сегмента.

5. Перевірка збіжності термомоделі (часовий крок і сітка)

Збіжність моделі оцінювали на прямолінійному проході (рис. 7) як еталонній задачі. Перевірку виконано за кроком часу $\Delta t = 0{,}01/0{,}005$ с і розміром елемента в зоні друку $h = 1/0{,}75/0{,}5$ мм. Критерієм збіжності вважали стабілізацію температурних історій у пробниках: відхилення пікової температури $T_{\max}$ між варіантами дискретизації не перевищувало 2 %. Тому для подальших інженерних оцінок прийнято $\Delta t = 0{,}01$ с і $h = 1$ мм. Контроль здійснювали за температурними історіями у пробниках (рис. 8), а порівняння кривих для різних Δt і h наведено на рис. 9–10.

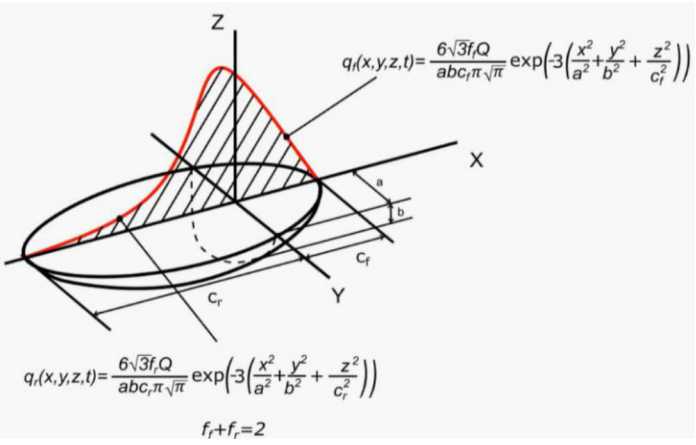


Рис. 6. Схема двоеліпсоїдного джерела тепла Голдака

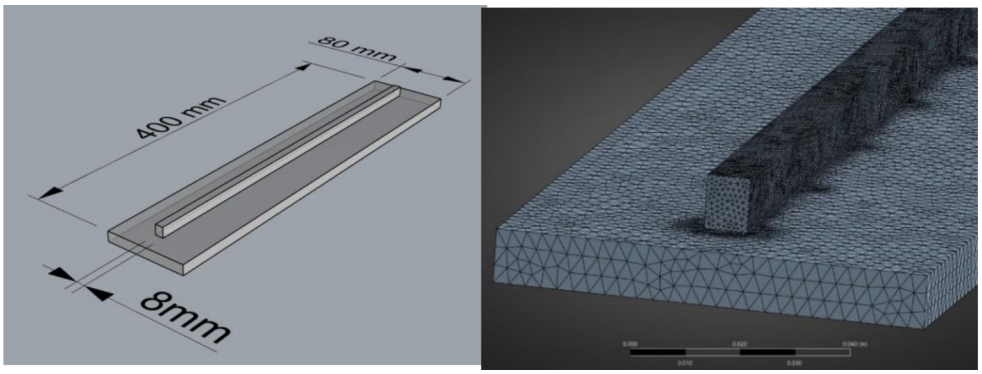


Рис. 7. Модель для оцінювання збіжності та приклад сітки 1 мм

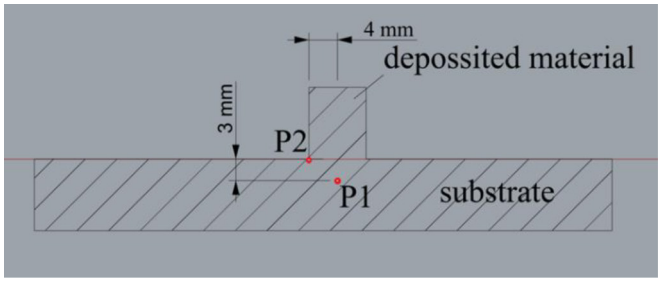


Рис. 8. Місця розташування точок контролю температури

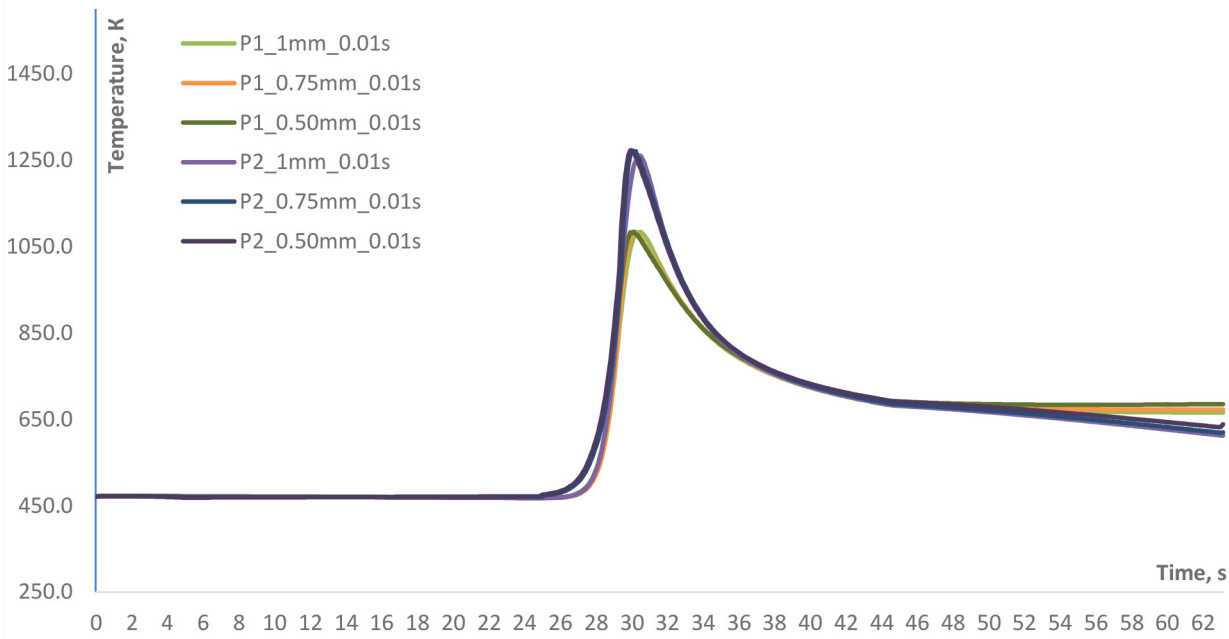


Рис. 9. Аналіз збіжності термомоделі: залежність температури у пробниках від розміру сітки

6. Індекси якості для перевірки траєкторій

Для кількісної оцінки теплових ризиків уздовж траєкторії введено інтегральні індекси якості, що обчислюються за температурою вузлів у часі. У скрипті визначені масиви I_{OVER}, I_{SOLID}, I_{FUSION}.

Індекс перегріву визначено як інтеграл перевищення температури над ліквідусом:

$$I_{\text{over}} = \int_0^t \max\left(0, T - T_{\text{liq}}\right) dt.$$

У реалізації накопичення відбувається лише за умови $T > T_{liq}$.

Фізичний зміст: кількісна міра «інтенсивності та тривалості» перебування матеріалу вище ліквідусу, що корелює з ризиком надмірної ванни розплаву, геометричних

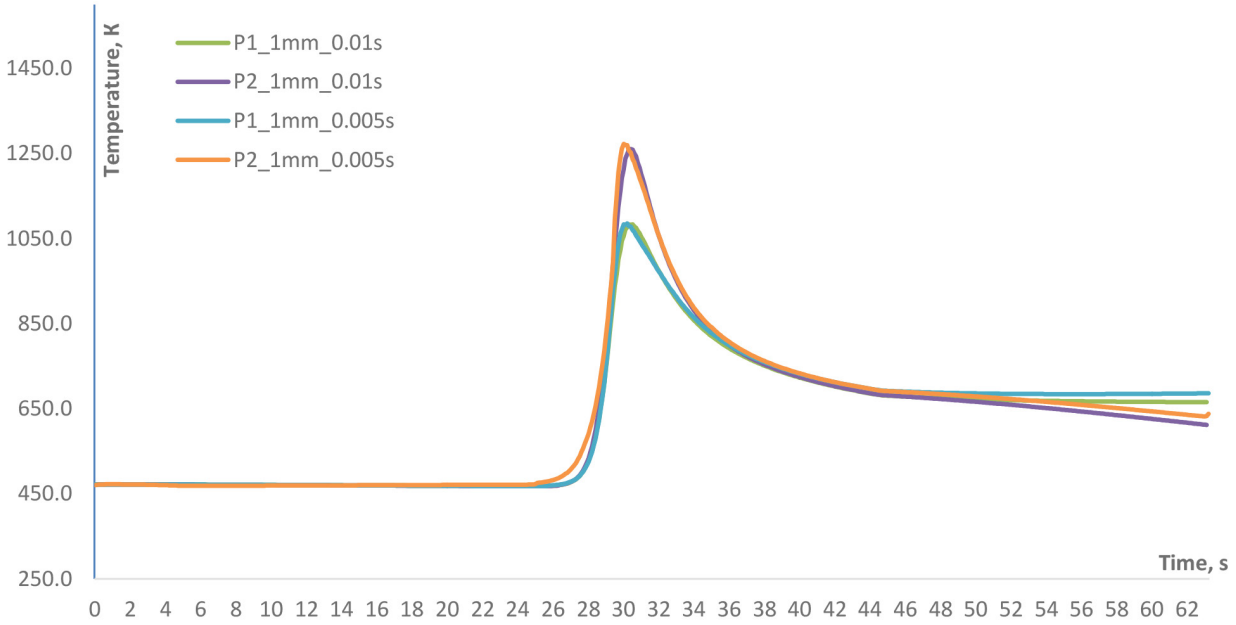


Рис. 10. Аналіз збіжності термомоделі: залежність температури у пробниках від кроку часу

відхилень них стінок і небажаних структурних наслідків перегріву.

Індекс ризику твердннення в моделі визначається як накопичувальна безрозмірна величина, що характеризує сукупний вплив швидкості охолодження та температурного стану матеріалу в інтервалі кристалізації. Індекс обчислюється лише в тих часових інтервалах, коли температура матеріалу перебуває між температурами солідусу T_{sol} і ліквідусу T_{liq}, а процес є охолодженням, тобто за умови:

$$T_{sol} < T < T_{liq}, \frac{dT}{dt} < 0.$$

Швидкість охолодження визначається як:

$$R_{cool} = -\frac{dT}{dt}.$$

Для врахування впливу швидкості охолодження вводиться нормований множник ризику:

$$R^* = clip\left(\frac{\left(R_{cool} - R_{crit}^{low}\right)}{\left(R_{crit}^{high} - R_{crit}^{low}\right)}, 0,1\right).$$

де R_{crit}^{low} і R_{crit}^{high} – нижнє і верхнє критичні значення швидкості охолодження, відповідно; функція *clip* обмежує значення в діапазоні 0…1.

Для врахування положення температури всередині інтервалу затвердіння використовується температурний говий множник:

$$T^* = \frac{T - T_{sol}}{T_{liq} - T_{sol}}; \quad w_T = (1 - T^*)^2.$$

Такий вибір забезпечує зростання ваги ризику в області температур, ближчих до солідусу, тобто на завершальній стадії кристалізації.

Тоді приріст індексу ризику твердннення на часовому кроці Δt визначається як:

$$\Delta I_{solid} = R^* w_T \frac{\Delta t}{t_{ref}},$$

де t_{ref} – опорний часовий масштаб для безрозмірного нормування.

Повний індекс ризику твердннення накопичується протягом усього теплового циклу:

$$I_{solid} = \sum \Delta I_{solid}.$$

Отже, запропонований індекс ураховує три основні фактори: наявність матеріалу в інтервалі кристалізації, інтенсивність охолодження та близькість температури до області завершення твердннення. З фізичного погляду це дозволяє використовувати індекс як локальний числовий критерій підвищеної імовірності формування пористості у процесі WAAM-виготовлення.

Індекс часу перебування вище солідусу визначали як:

$$I_{fusion} = \int_0^t H\left(T - T_{sol}\right) dt,$$

де H – функція Гевісайда. Реалізується як сумування Δt за умови $T > T_{sol}$.

Фізичний зміст: оцінює тривалість перебування матеріалу в температурному діапазоні активного твердіння/переплавлення, що впливає на повторні нагріви, стабільність сплавлення проходів і накопичення тепла.

6.1. Практичне використання індексів

Індекси аналізуються як просторові поля та статистичні показники з фіксацією координат, у яких досягалися мінімальні і максимальні значення. Для порівняння як референтну прийнято прямолінійну ділянку. Ділянку вважали такою, що потребує коригування, якщо у просторово зіставних точках I_{over} або I_{solid} перевищували референтні більш ніж на 20 %, або мінімальне значення I_{fusion} було нижчим за референтне більш ніж на 20 %. Критерій має відносний характер і не визначає поріг виникнення фізичних дефектів.

Результати. За розрахованими температурними історіями отримано просторові поля індексів (рис. 11, 12), які дають змогу локалізувати ділянки повторного нагріву, тривалого перебування вище солідусу та нерівномірного теплового впливу. Кількісні значення індексів для характерних ділянок траєкторії наведено в табл. 2. Найбільша неоднорідність спостерігалася в місцях зближення суміжних проходів, на різких поворотах і поблизу початку та завершення сегментів. У вузьких зонах між проходами виявлено ознаки недостатнього теплового перекриття, тоді як на кутових ділянках формувалися підвищені локальні значення індексів. Порівняння з референтною прямолінійною ділянкою підтвердило необхідність локального коригування окремих фрагментів траєкторії. Отримані результати вказують на доцільність згладжування різких поворотів, зміни послідовності проходів, перенесення місць їх початку і завершення та, за потреби, уведення охолоджувальних пауз.

Обговорення отриманих результатів. Запропонована методика має передекспериментальний характер і базується на

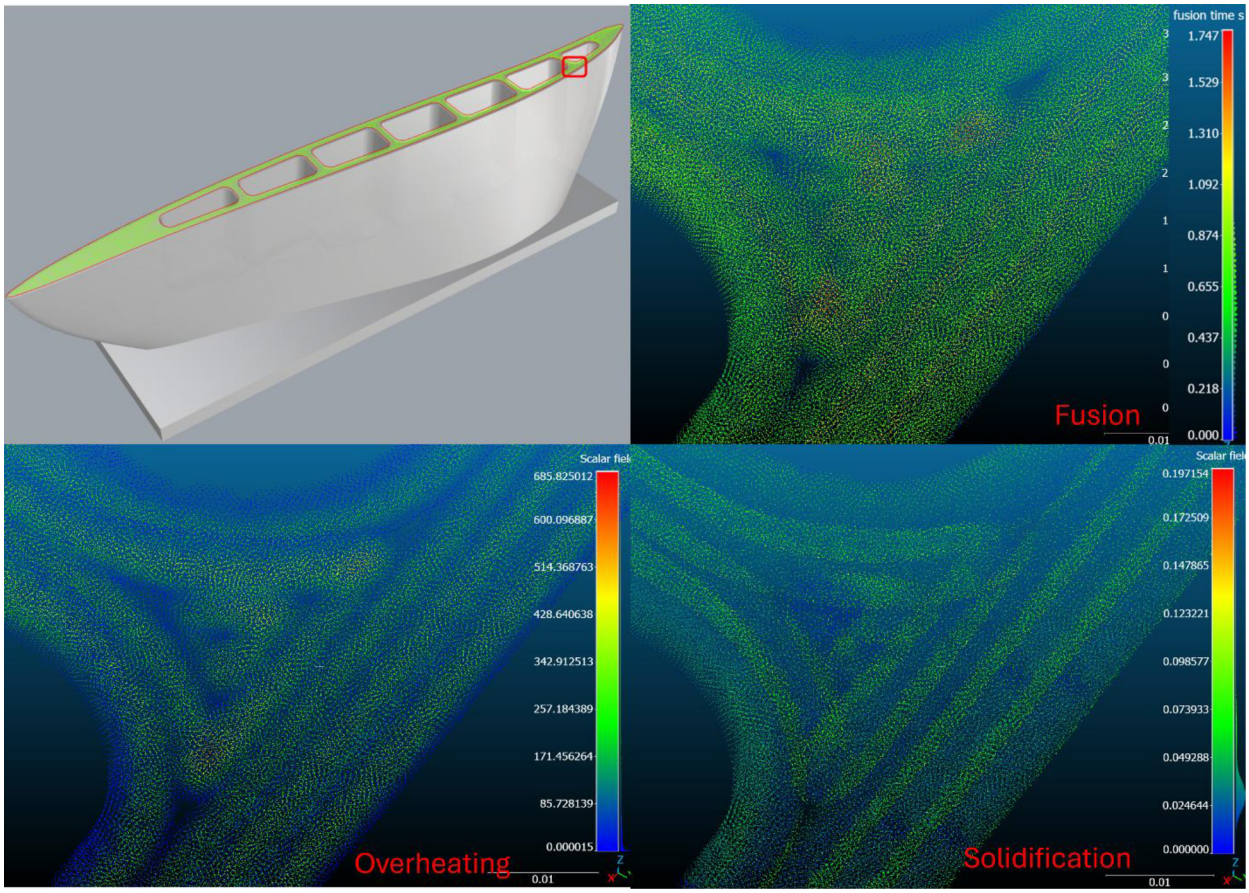


Рис. 11. Розподіл теплових індексів у зоні кутового з'єднання проходів

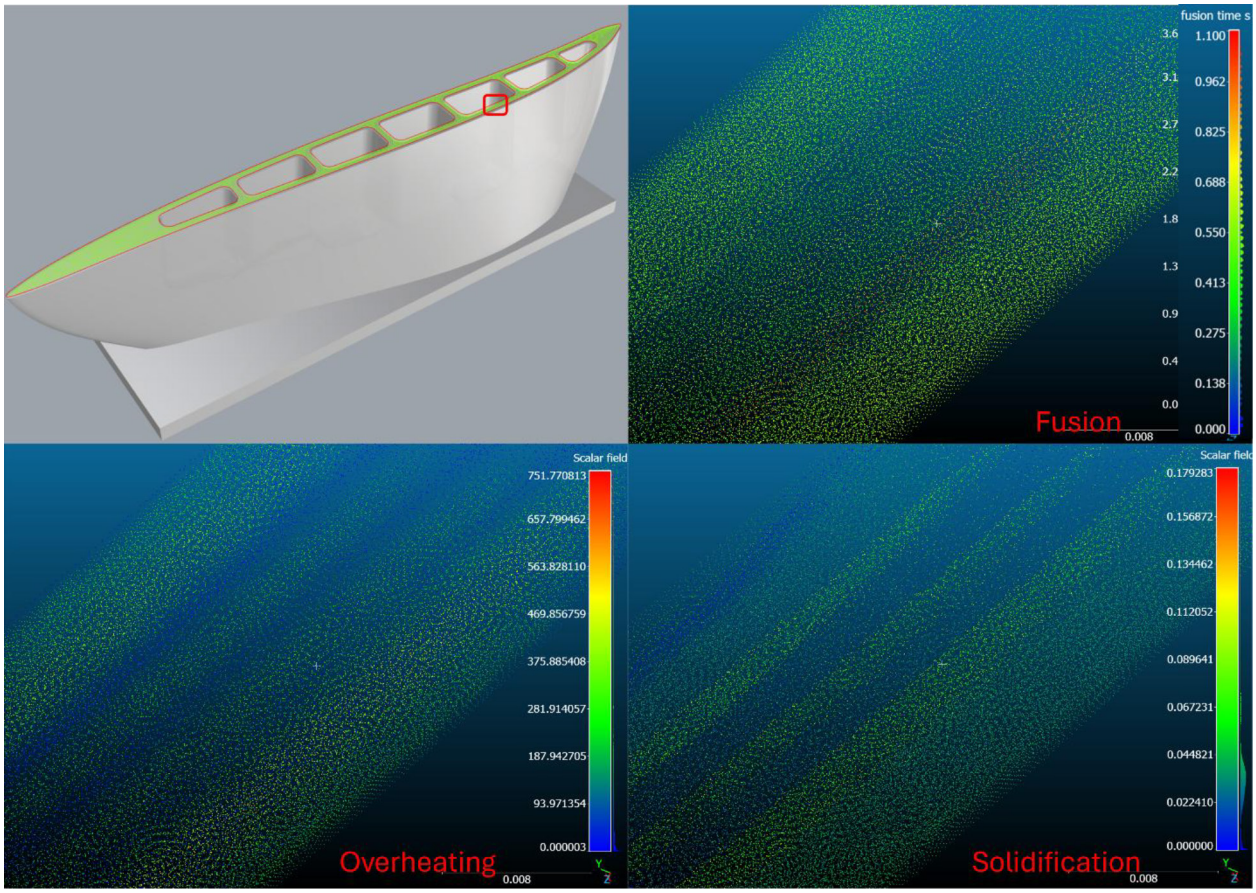


Рис. 12. Розподіл теплових індексів у зоні паралельних суміжних проходів

Таблиця 2. Значення теплових індексів у характерних ділянках траєкторії

Ділянка траєкторії	I_{over}^{min}, К · с	I_{over}^{max}, К · с	I_{solid}^{min}	I_{solid}^{max}	I_{fusion}^{min}, с	I_{fusion}^{max}, с
Прямолінійна	0	573	0,019	0,084	0,123	0,678
Кутова	0	685	0,025	0,197	0,132	1,747
Суміжні проходи	0	751	0,021	0,179	0,125	1,100

контрольованих припущеннях. Теплофізичні властивості задано за відкритими даними для бронзи C63200, однак характеристики WAAM-наплавки можуть різнитися через особливості сформованої мікроструктури та потребують уточнення [9; 11]. Перевірка збіжності підтвердила придатність прийнятих кроку часу та сітки для інженерної оцінки траєкторії [5; 16]. Індекси I_{over}, I_{solid}, I_{fusion} дають змогу кількісно оцінювати тепловий стан і локалізувати ділянки, що потребують коригування. За вибраних параметрів загалом формується безперервне теплове поле, однак в окремих зонах спостерігаються недостатнє теплове перекриття та нерівномірне тепловкладення. Тому коригування насамперед потребують кутові ділянки, послідовність проходів і місця їх початку і завершення; за потреби можуть змінюватися і охолоджувальні паузи [1; 4; 6].

Параметри джерела Голдака та граничного теплообміну потребують експериментального калібрування [8; 17]. Просторові поля індексів у поєднанні із прийнятою геометрією валиків можуть також використовуватися для попереднього оцінювання припуску на механічну обробку та зон можливого надлишкового формування. Для внутрішніх поверхонь це дає змогу оцінити можливий вплив напливів на доступ різального інструменту. Тому геометрію комірок і послідовність їх формування варто узгоджувати з вимогами до подальшої оброблюваності [12; 13]. Остаточна оцінка індексів, параметрів моделі потребує експериментальної валідації.

Висновки

1. Запропоновано передекспериментальний підхід перевірки траєкторії шару для WAAM-CMT виготовлення елементів лопаті з комірчастими структурами на основі тривимірного теплового моделювання в ANSYS APDL.

2. Реалізовано модель з активацією матеріалу, джерелом Голдака й урахуванням імпульсів CMT; збіжність підтверджено за часом і сіткою.

3. Введено індекси I_{over}, I_{solid}, I_{fusion} для кількісної оцінки перегріву й умов твердnення та локалізації критичних зон.

Коригування потребують кутові ділянки, місця початку і завершення проходів і зони недостатнього теплового перекриття. Подальші дослідження варто спрямувати на експериментальне калібрування моделі та перевірку зв'язку індексів із геометрією валиків і дефектами.

Список літератури

[1] Kesarwani S., Yuvaraj N., Niranjan M.S. CMT-based WAAM: A comprehensive review of process parameters, their effects, challenges, and future scope. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2025. № 47 (1). Article 11. https://doi.org/10.1007/s40430-024-05276-0

[2] Queguineur A., Rückert G., Cortial F., Hascoët J.-Y. Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications. *Welding in the World*. 2018. № 62 (2). P. 259–266. https://doi.org/10.1007/s40194-017-0536-8

[3] Biegler M., Wang J., Kaiser L., Rethmeier M. Automated tool-path generation for rapid manufacturing of additive manufacturing directed energy deposition geometries. *Steel Research International*. 2020. № 91 (10). Article 2000017. https://doi.org/10.1002/srin.202000017

[4] Cambon C., Rouquette S., Bendaoud I., Bordreuil C., Wimpory R., Soulié F. Thermo-mechanical simulation of overlaid layers made with wire + arc additive manufacturing and GMAW-cold metal transfer. *Welding in the World*. 2020. № 64 (8). P. 1427–1435. https://doi.org/10.1007/s40194-020-00951-x

[5] Chen Z., Yuan L., Pan Z., Zhu H., Ma N., Ding D., Li H. A comprehensive review and future perspectives of simulation approaches in wire arc additive manufacturing (WAAM). *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2025. № 7 (2). Article 022016. https://doi.org/10.1088/2631-7990/ada380

[6] Barath Kumar M. D., Manikandan M. Assessment of process parameters, residual stress mitigation, post treatments and finite element analysis simulations of wire arc additive manufacturing technique. *Metals and Materials International*. 2022. № 28 (1). P. 54–111. https://doi.org/10.1007/s12540-021-01015-5

[7] Graf M., Hälsig A., Höfer K., Awiszus B., Mayr P. Thermo-mechanical modelling of wire-arc additive manufacturing (WAAM) of semi-finished products. *Metals*. 2018. № 8 (12). Article 1009. https://doi.org/10.3390/met8121009

[8] Montevecchi F., Venturini G., Scippa A., Campatelli G. Finite element modelling of wire-arc additive manufacturing process. *Procedia CIRP*. 2016. № 55. P. 109–114. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.024

[9] Orzolek S. M., Semple J. K., Fisher C. R. Nickel-aluminum bronze (NAB) review: Additive manufacturing and weldability (Technical Report № NSWCCD-61-TR-2021/9). Naval Surface Warfare Center, Carderock Division. 2021.

[10] Carlton J. S. Marine propellers and propulsion. 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2019.

[11] Shen C., Mu G., Hua X., Li F., Luo D., Ji X., Zhang C. Influences of postproduction heat treatments on the material anisotropy of nickel-aluminum bronze fabricated using wire-arc additive manufacturing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. № 103 (5–8). P. 3199–3209. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03700-7

[12] Lu G.-X., Chen T.-C., Shiue R.-K., Tsay L.-W. Effects of surface modifications on rotating bending fatigue of Ni-Al bronze alloy. *Metals*. 2025. № 15 (1). Article 19. https://doi.org/10.3390/met15010019

[13] Roshan M., Mahtabi M. B., Ranjbar Eslamloo S., Behvar A., Haghshenas M. A review on fatigue characteristics of nickel-aluminum bronze (NAB): Conventionally fabricated and additively manufactured.

Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2025. № 48 (2). P. 389–417. https://doi.org/10.1111/ffe.14495

[14] Klötzer-Freese C., Kruse T., Khalil M., Greitsch L. Hybrid manufacturing of a hollow ship's propeller: Investigation from material characterization to implementation. *Proceedings of the Eighth International Symposium on Marine Propulsors (smp'24)* / K. Koushan, S. Steen (Chairs). 2024. P. 737–745. https://doi.org/10.15480/882.9360

[15] Nota C., Rückert G., Heuzé J. L., Carlino L., Quenez J. M., Courregelongue L. A first feedback on manufacturing and in-service behaviour of a WAAM-made propeller for naval application. *Welding in the World*. 2023. № 67 (5). P. 1281–1289. https://doi.org/10.1007/s40194-023-01475-w

[16] Sampaio R. F. V., Pragana J. P. M., Bragança I. M. F., Silva C. M. A., Nielsen C. V., Martins P. A. F. Modelling of wire-arc additive manufacturing: A review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2023. № 6. Article 100121. https://doi.org/10.1016/j.aime.2023.100121

[17] Goldak J., Chakravarti A., Bibby M. A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical Transactions B*. 1984. № 15 (2). P. 299–305. https://doi.org/10.1007/BF02667333

[18] Манько В. В. 3D thermal model of WAAM-CMT in ANSYS APDL for NAB [Data set]. Zenodo. 2026. https://doi.org/10.5281/zenodo.21791128

© Манько В. В.

Дата надходження статті до редакції: 06.07.2026
Дата затвердження статті до друку: 13.08.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 20.10.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0