

## КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

DOI: 10.31319/2519-2884.44.2024.19

УДК 004.94:519.6

**Карімов І.К.**, к.ф.-м.н., доцент, ORCID: 0000-0003-4145-9726, e-mail: ikarimov@ukr.net

**Вернигора Д.В.**, здобувач третього (доктор філософії) рівня, e-mail: vm\_dstu@ukr.net

**Карімов Г.І.**, к.е.н., доцент, ORCID: 0000-0002-0208-2607, e-mail: gkarimov@ukr.net

**Лисенко А.В.**, здобувач третього (доктор філософії) рівня, e-mail: jmd477@gmail.com  
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

**Karimov Ivan**, Candidate of Sciences (Physical and Mathematical), Associate Professor, Head of the Department of Mathematical Modeling and System Analysis

**Vernygora Dmytro**, postgraduate student

**Karimov Hennadii**, Candidate of Sciences (Economics), Associate Professor, Associate Professor of Management Department

**Lysenko Andrii**, postgraduate student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

### МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ПЛИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ В ПРОЦЕСІ МІСЦЕВОГО НАГРІВУ

*У роботі розглядається ресурсозберігаючий процес місцевого нагріву плитних конструкцій, виготовлених методом електрошлакового зварювання. Наводяться результати обчислювального експерименту, проведеного на основі раніше створеної комп'ютерно орієнтованої моделі процесу. Встановлені закономірності теплового стану плити, зумовлені локальним підведенням теплоти до виробу. Аналіз закономірностей дав можливість запропонувати модифіковану схему місцевого нагріву з введенням буферних зон з підвищеною щільністю теплового потоку. Результати обчислювального експерименту, проведеного на основі уточненої математичної моделі, свідчать про енергоефективність такого підходу при дотриманні технологічних вимог до процесу, а також про потенційні можливості комп'ютерної моделі для удосконалення схем організації місцевого нагріву.*

**Ключові слова:** математична модель; комп'ютерна реалізація; обчислювальний експеримент; місцевий нагрів; енергоефективність.

*The paper considers the resource-saving process of local heating of plate construction made by the method of electroslag welding. The presented results of a computational experiment conducted on the basis of a previously created computer-oriented process model are given. The established regularities of the thermal state of the plate are conditioned by the local supply of heat to the product. Analysis of regularities made it possible to propose a modified scheme local heating with the introduction of buffer zones with increased heat flow density. The results of a computational experiment conducted on the basis of a refined mathematical model testify to the energy efficiency of such an approach in compliance with the technological requirements for the process, as well as to the potential capabilities of the computer model for improving schemes organization local heating.*

**Keywords:** mathematical model; computer implementation; computational experiment; local heating; energy efficiency.

### Постановка проблеми

При виготовленні великогабаритних виробів методом електрошлакового зварювання в зоні навколо зварного шва виникають досить значні термічні напруження, які в подальшому можуть стати причиною різних небажаних ефектів і навіть руйнування конструкцій [1]. В зв'язку з цим обов'язковим етапом виготовлення таких конструкцій є проведення термічної обробки для зняття термічних напружень. Технологія термічної обробки передбачає нагрів výro-

бу до певної температури з швидкістю, що не перевищує заданої; витримку на протязі певного часу і охолодження з регламентованою швидкістю. Графік термічної обробки повинен витримуватися в певній зоні навколо шва, в зв'язку з чим поширення набула так звана місцева термообробка, яка є прогресивним ресурсозберігаючим процесом [2]. В той же час вплив локального підведення теплоти на тепловий стан виробу має суттєві особливості і потребує подальшого вивчення для обґрунтування режимів термічної обробки.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Місцевому нагріву конструкцій, виготовлених методом електрошлакового зварювання, присвячені роботи ряду дослідників, зокрема, українських вчених І.Н. Манусова, М.М. Біляєва, В.А. Сороки, Г.Ф. Алексєєва та інших. В них на основі крайових задач теплопровідності досліджується тепловий стан виробів різної форми в різних умовах зовнішнього теплообміну [2]. При цьому переважно використовувалися лінійні моделі і аналітичні методи розв'язування задач. Чисельно-аналітичні схеми розрахунку зварних пластинчатих систем розглянуті в роботі [3]. У роботі [4] для дослідження кінетики нагрівання низьковуглецевої сталі при місцевій термообробці використаний чисельний розв'язок одновимірної задачі теплопровідності методом скінченних різниць. Відомі також окремі дослідження особливостей місцевого нагріву великогабаритних конструкцій на основі нелінійних математичних моделей з використанням економічних різнице-вих схем для їх реалізації [5—7]. В той же час багатогранність процесів місцевої термообробки з точки зору режимів та геометрії виробів потребують подальших досліджень даної проблеми.

#### Формулювання мети дослідження

Мета дослідження полягає в аналізі впливу технологічних параметрів місцевого нагріву на тепловий стан плитних конструкцій.

#### Виклад основного матеріалу

Розглянемо процес місцевого нагріву великогабаритних зварних конструкцій, які можна розглядати як плиту товщиною  $2R$ . Схема процесу в рамках двохзонної моделі представлена на рис. 1.

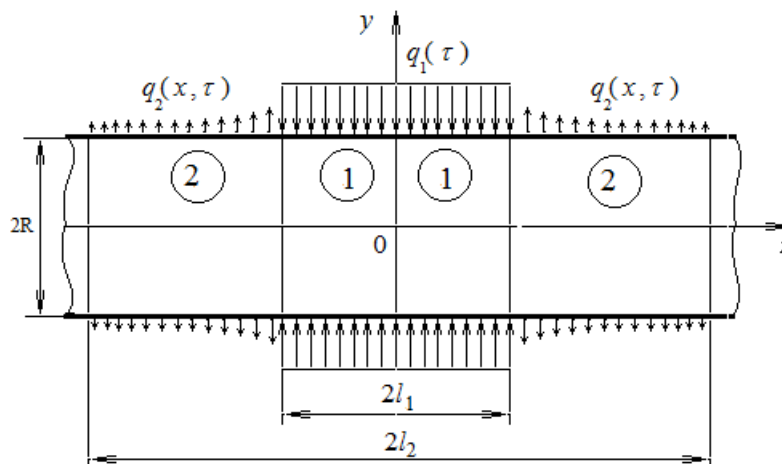


Рис. 1. Схема місцевого нагріву плитних конструкцій

Відповідно до прийнятої схеми, за умовами теплообміну з зовнішнім середовищем на поверхні виробу виділені зони 1 і 2, причому в зонах 1 до виробу підводиться тепловий потік, щільність якого  $q_1(\tau)$  по поверхні постійна, а в часі може змінюватися. В зонах 2 відбувається радіаційно-конвективне охолодження виробу, при цьому щільність теплового потоку  $q_2(x, \tau)$  змінюється як в часі, так і по поверхні.

З точки зору технології місцевої термообробки, найбільш цікавими є питання щодо впливу ширини зони теплопідведення 1 і щільності теплового потоку  $q_1(\tau)$  на перепади температур по довжині зони 1 та по товщині виробу. Для дослідження цих питань використаємо математичну модель та алгоритм її реалізації, запропоновані нами в роботі [7]. Зауважимо, що

використана нелінійна математична модель та локально-одновимірний метод її реалізації із залученням модифікованого методу елементарних теплових балансів для виведення різницевих співвідношень в граничних точках [5—7].

Для проведення обчислювального експерименту створена програма, яка реалізована в середовищі PascalABCnet. Вибір середовища зумовлений цілями даного дослідження і перспективою його продовження в напрямку створення програмного забезпечення для використання іншими дослідниками та технологами.

Базовий варіант об'єкта дослідження характеризується наступними параметрами: товщина плити  $2R=0,4$  м; довжини зон  $l_1 = 0,5$  м,  $l_2 = 1,5$  м; матеріал плити — сталь 20; початкова температура  $t_0 = 20$  °С, температура навколишнього середовища (зона 2)  $t_c = 20$  °С. Щільність теплового потоку в зоні теплопідведення  $q_1 = 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>; щільність теплового потоку в зоні 2 задається формулами

$$q_2(x, \tau) = \alpha (t_c - t(x, R, \tau)),$$

$$\alpha = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon_m \left[ T_n^3 + T_n^2 \cdot T_c + T_n \cdot T_c^2 + T_c^3 \right] + 2,55 \cdot \sqrt[4]{T_n - T_c},$$

де  $\varepsilon_m$  — ступінь чорноти поверхні;  $T_n = t(x, R, \tau) + 273$ ;  $T_c = t_c + 273$ .

Параметри різницевої сітки:  $\Delta x = 0,05$  м;  $\Delta y = 0,05$  м;  $\Delta \tau = 60$  с.

Деякі результати обчислювального експерименту представлені на рис. 2—3.

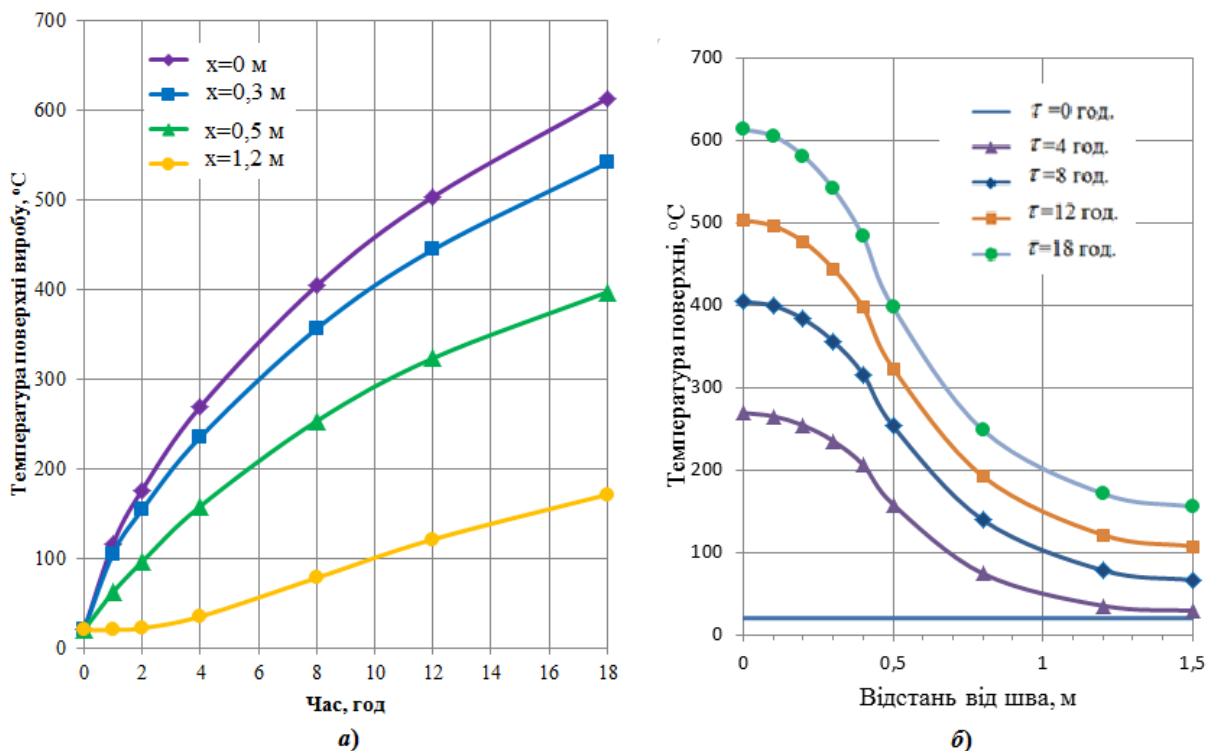


Рис. 2. Розподіл температур в часі в характерних точках поверхні (а) та по довжині плити в окремі моменти часу (б)

Температурне поле виробу при вказаних параметрах показано на рис. 2. Видно, що локальний характер підведення теплоти суттєво впливає на температурні поля на поверхні плити. Швидкість нагріву по мірі віддалення від зварного шва суттєво зменшується. На межі зоні 1 ( $x = 0,5$  м) має місце точка перегину температурних кривих, що зумовлено наявністю зони 2, в якій відбувається охолодження виробу навколишнім середовищем.

Особливе значення для технологічного процесу мають перепади температур по мірі віддалення від зварного шва  $\Delta t_x = t(x, R, \tau) - t(0, R, \tau)$  та по товщині виробу

$\Delta t_y = t(x, R, \tau) - t(x, 0, \tau)$ . Результати відповідних розрахунків наведені на рис. 3. Видно, що  $\Delta t_x$  суттєво зростає як в часі, так і по мірі віддалення від зварного шва (рис. 3, а).

Перепади температур по товщині плити  $\Delta t_y$  значно менші, при цьому температури поверхні ( $y = R$ ) і центральної площини ( $y = 0$ ) поступово вирівнюються і на певній відстані від шва температура центральної площини перевищує температуру поверхні ( перепад  $\Delta t_y$  стає від'ємним ). Специфіка місцевого нагріву проявляється в тому, що криві  $\Delta t_y$  мають дві точки перегину, одна з яких знаходиться на межі зон 1 і 2, друга — в зоні 2 (рис. 3, б).

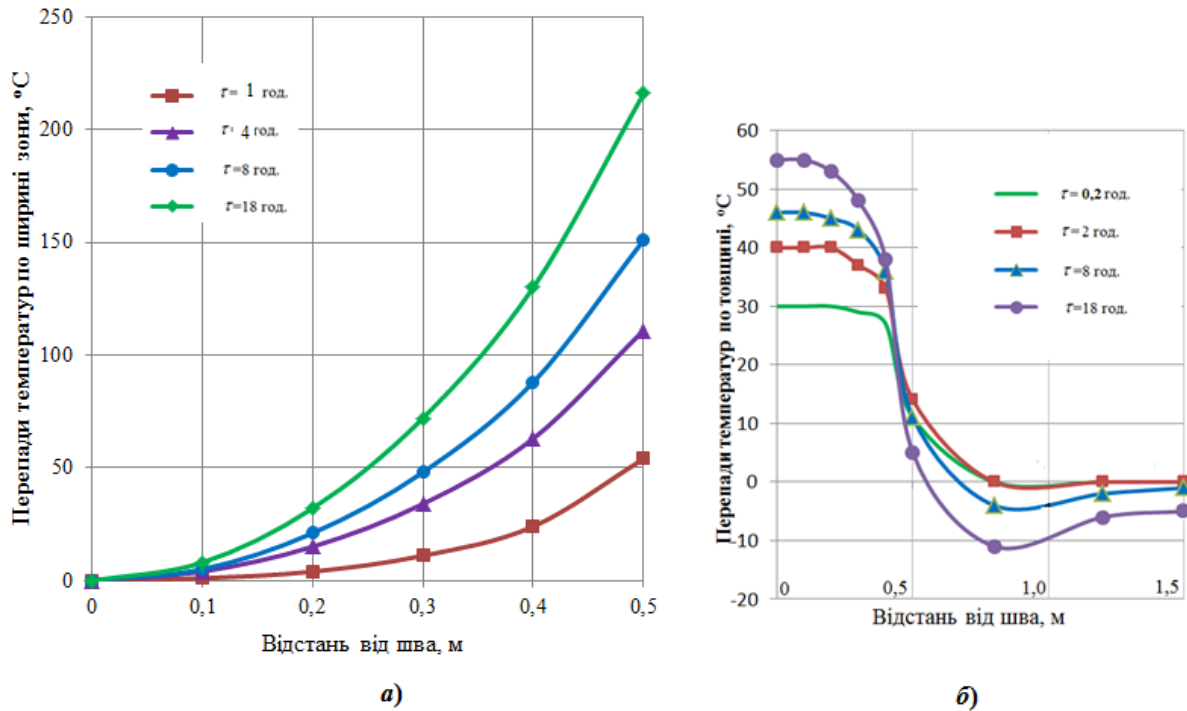


Рис. 3. Перепади температур на поверхні (а) та по товщині плити(б)

Наявність значних перепадів температур по ширині зони підведення теплоти ставить задачу такої організації зовнішнього теплообміну в зоні 1, при якій вказані перепади не перевищували б допустимих за технологією термообробки. Одним із варіантів вирішення цієї задачі може бути введення в зоні 1 так званих «буферних» зон для компенсації відтоку теплоти в зону 2. Щільність теплового потоку в буферних зонах повинна бути вищою, ніж в основній зоні [8].

Для дослідження впливу буферних зон на тепловий стан виробів використана модифікована схема місцевого нагріву (рис. 4). Математична модель процесу дещо змінилася, в алгоритм та комп'ютерну програму моделювання внесені зміни, що враховують додаткову зону з підвищеною щільністю теплового потоку.

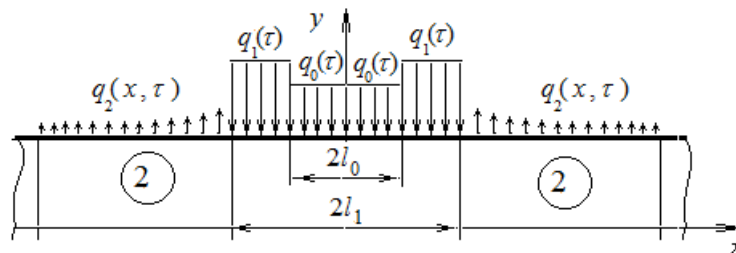


Рис. 4. Модифікована схема місцевого нагріву плитних конструкцій

Обчислювальний експеримент проводився для випадку, коли  $l_1 = 0,5$  м,  $l_0 = 0,3$  м, тобто довжина буферної зони складає 0,2 м.

Густина теплового потоку в буферній зоні прийнята вдвічі більшою, ніж в основній зоні ( $q_1 = 2q_0$ ). Решта параметрів такі ж, як і раніше. Перш за все, зауважимо, що зона зварного шва прогрівається значно швидше — час нагріву до температури  $630$  °С складає 11 год. Природно, перепад температур по зоні 1 повинен зростати. Однак, через наявність буферної зони зростання перепаду по всій зоні 1 не спостерігається (рис. 5, а), навіть має місце зменшення перепаду температур приблизно на 10 %.

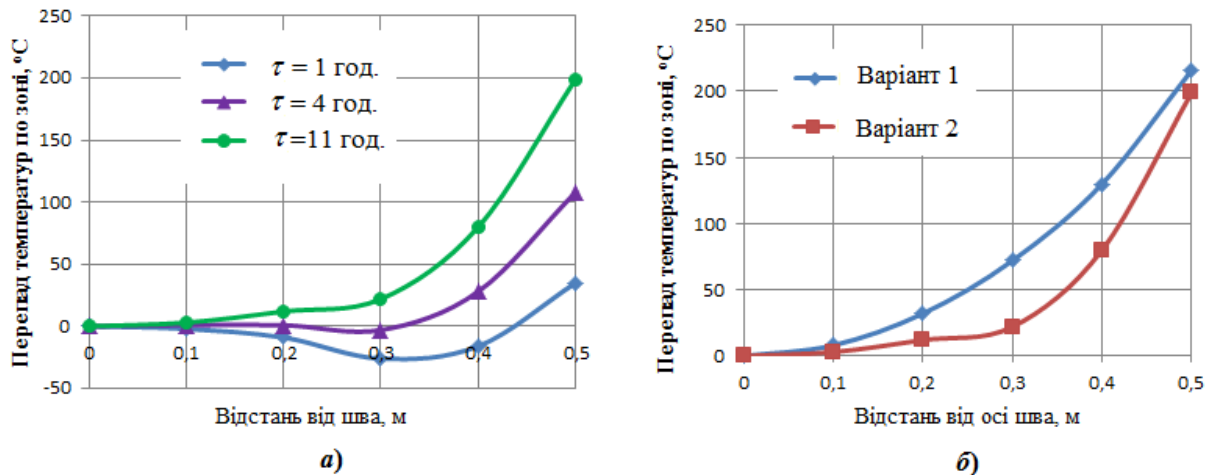


Рис. 5. Перепади температур по ширині зони 1

Якщо ж брати перепад температур ближче до шва, то цей показник ще кращий. Це добре видно з рис. 5, б, на якому результати базового варіанту (варіант 1) порівнюються з реалізацією модифікованої схеми нагріву (варіант 2). В обох варіантах розглядаються температурні поля в момент досягнення заданої температури нагріву (1 варіант — 18 год., 2 варіант — 11 год.). Технологи зазвичай задають графіки термообробки, виходячи з умови, що на відстані 0,2 м від зварного шва перепад температур не повинен перевищувати  $\Delta t = 20$  °С. В варіанті 2 він складає  $[\Delta t]_2 = 12$  °С.

Можна оцінити ефективність розглянутих варіантів за обсягом витраченої на їх реалізацію теплоти  $Q = q_{cp} \cdot S \cdot \tau$ , де  $q_{cp}$  — усереднена густина теплового потоку в зоні 1;  $S$  — площа поверхні плити в зоні 1;  $\tau$  — час нагріву до заданої температури. Для варіанта 1 маємо  $q_{cp} = q_0$ ; для варіанта 2 —  $q_{cp} = (q_0 \cdot 0,3 + 2 \cdot q_0 \cdot 0,2) / 0,5 = 1,4 \cdot q_0$ . Отже,  $Q_1 = 18 \cdot q_0 \cdot S$ ;  $Q_2 = 1,4 \cdot q_0 \cdot S \cdot 11 = 15,4 \cdot q_0 \cdot S$ ;  $Q_1 / Q_2 = 18 / 15,4 \approx 1,17$ , тобто варіант 2 є енергозберігаючим порівняно з варіантом 1.

Таким чином, результати обчислювального експерименту показують, що місцевий нагрів за модифікованою схемою (варіант 2) дає можливість не тільки забезпечити технологічні параметри, а й підвищити енергоефективність процесу. Перепад температур  $[\Delta t]_2 = 12$  °С, який значно менший від допустимого, свідчить про можливість створення ще більш енергоефективних умов процесу місцевого нагріву плитних конструкцій при дотриманні технологічних обмежень.

#### Висновки

У роботі на основі обчислювального експерименту проаналізовані особливості місцевого нагріву плитних конструкцій, виготовлених методом електрошлакового зварювання. Використана нелінійна математична модель та локально-одновимірний метод її реалізації із залученням модифікованого методу елементарних теплових балансів для виведення різницьових співвідношень в граничних точках. Встановлений суттєвий вплив локального характеру підве-

дення теплоти на характеристики процесу, зокрема, на швидкість нагріву та перепади температур по мірі віддалення від зварного шва.

Для підвищення рівномірності нагріву запропонована модифікована схема процесу, яка передбачає наявність буферних зон на границях зони підведення теплоти. Обчислювальний експеримент за оновленою математичною моделлю підтвердив можливість не тільки забезпечити технологічні параметри, а й підвищити енергоефективність процесу в цілому.

### Список використаної літератури

1. Кривов Г.О., Зворикін К.О. Виробництво зварних конструкцій: підручник. К.:КВІЦ, 2012. 896 с.
2. Компанієць Р. А. Місцева термообробка великогабаритних виробів: застосування та проблеми проектування технології/ Achievements of 21st Century Scientific Community: Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Internet Conference, September 14-15, 2023. Dnipro: FOP Marenichenko V.V., 2023. P. 223–225.
3. Цоцко В.І., Спиридонова І.М., Пелешенко Б.Г. Кінетика нагрівання та плавлення поверхні зразків низьковуглецевої сталі при місцевій термообробці. *Фізика і хімія твердого тіла*. Івано-Франківськ, 2008. Т.9, №3. С. 639–643.
4. Добрянський І. М., Божидарнік В. В. Чисельно-аналітичні схеми розрахунку зварних пластинчатих систем. *Міжвузівський збірник "Наукові нотатки"*. Луцьк, 2012. Вип. 37. С. 31–37.
5. Манусов І. Н., Карімов І. К. Моделювання місцевого нагріву плитних конструкцій у режимі непрямого теплообміну. *Ювілейний збірник науково-технічних праць*. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1995. С. 322–328.
6. Карімов І.К. Комп'ютерно орієнтований алгоритм керування процесом місцевої термообробки великогабаритних деталей. *Математичне моделювання*. 2015. № 1(32). С. 45–48.
7. Карімов І.К., Карімов Г.І., Компанієць Р.А., Булай О.Ю. Комп'ютерно орієнтований алгоритм моделювання місцевого нагріву плитних конструкцій. *Наука і техніка сьогодні*. 2024. №1(29). С. 689–700.
8. Карімов І.К., Пододня А.П. До питання моделювання теплової роботи газових печей для місцевої термообробки великогабаритних виробів/ Проблеми математичного моделювання: матеріали Всеукр. наук.-метод. конф., 26-28 трав. 2021. Кам'янське: ДДТУ, 2021. С. 23–24.

### MODELING OF THE THERMAL STATE OF PLATE CONSTRUCTION IN THE PROCESS OF LOCAL HEATING

#### Abstract

Processes of local heat treatment of large-sized products made by the method of electroslag welding are resource-saving. At the same time, their spread is restrained by the insufficient study of the influence of local heat supply on the thermal state of products, which determines the relevance of this work.

The purpose of the work is mathematical modeling of the thermal state of plate construction in the process of local heating, finding ways to improve the process. The task of the work — is to conduct a computer experiment, analyze the influence of technological parameters on the main characteristics of the process.

Were used for the computational experiment non-linear mathematical model and a locally one-dimensional method of its implementation with the involvement of a modified method of elementary heat balances to derive the difference ratios at the boundary points. The results of the computational experiment showed a significant influence of the local nature of the heat supply on the process characteristics, in particular, on the heating rate and temperature differences. Especially significant differences occur temperature in the heat supply zone, i.e. as the distance from the weld. Temperature differences across the plate thickness are much smaller, while the surface and central plane temperatures

gradually equalize and at a certain distance from the seam, the central plane temperature exceeds the surface temperature. The specificity of local heating is manifested in the fact that the curves differences across of temperature in thickness of the plate have two inflection points, one of which is located on the border of the heat supply and cooling zones, the second — in the cooling zone.

The analysis of the revealed regularities made it possible to propose a modified scheme of local heating with the introduction of buffer zones with increased heat flow density at the borders of the heat supply zone. The computational experiment based on the updated mathematical model confirmed the possibility not only to increase the uniformity of heating and ensure technological parameters, but also to increase the energy efficiency of the process as a whole.

The analysis of the results also shows the potential possibilities of the computer model for further improvement schemes organization of local heating, in particular, in the direction of specifying external heat exchange parameters to ensure heat treatment in accordance with the technological schedule.

### References

- [1] Kryvov, H.O., & Zvorykin, K.O. (2012). *Vyrobnytstvo zvarnykh konstrukttsii: pidruchnyk* [Production of welded construction]. Kyiv: KViTs [in Ukrainian].
- [2] Kompaniets, R.A. (2023). *Mistseva termoobrobka velykohabarynykh vyrobiv: zastosuvannia ta problemy proektuvannia tekhnologii* [Local heat treatment of large-sized products: application and design problems of the technology]. Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Internet Conference: *Achievements of 21st Century Scientific Community*. (pp. 223-225). Dnipro: FOP Marenichenko V.V. [in Ukrainian].
- [3] Tsotsko, V.I., Spirydonova, I.M., & Peleshenko, B.H. (2008). *Kinetyka nahrivannia ta plavlennia poverkhni zrazkiv nyzkovuhletsevoi stali pry mistsevii termoobrobtsi* [Kinetics of heating and melting of the surface of low-carbon steel samples during local heat treatment]. *Solid state physics and chemistry*, Vol. 9, 3, 639-643[in Ukrainian].
- [4] Dobrianskyi, I. M., & Bozhydarnik, V. V. (2012). *Chyselno-analitychni skhemy rozrakhunku zvarnykh plastynchatykh system* [Numerical-analytical calculation schemes of welded plate systems]. *Interuniversity collection "Scientific Notes"*, 37, 31-37 [in Ukrainian].
- [5] Manusov, I.N., & Karimov, I.K. (1995). *Modeliuvannia mistsevoho nahrivu plynykh konstrukttsii u rezhymi nepriamoho teploobminu* [Modeling of local heating of plate construction in the mode of indirect heat exchange]. *Jubilee collection of scientific and technical works*, 322-328 [in Ukrainian].
- [6] Karimov, I.K. (2015). *Kompiuterno oriientovanyi alhorytm keruvannia protsesom mistsevoi termoobrobky velykohabarynykh detalei* [A computer-oriented algorithm for controlling the process of local heat treatment of large-sized parts]. *Mathematical modeling*, 1(32), 45-48 [in Ukrainian].
- [7] Karimov, I.K., Karimov, H.I., Kompaniets, R.A., & Bulai, O.Iu. (2024). *Kompiuterno oriientovanyi alhorytm modeliuvannia mistsevoho nahrivu plynykh konstrukttsii* [Computer-oriented algorithm for modeling local heating of plate construction]. *Science and technology today*, №1(29), 689-700 [in Ukrainian].
- [8] Karimov, I.K., & Pododnia A.P. (2021). *Do pytannia modeliuvannia teplovoi roboty hazovykh pechei dlia mistsevoi termoobrobky velykohabarynykh vyrobiv* [On the issue of modeling the thermal operation of gas furnaces for local heat treatment of large-sized products]. *Materials Vseukr. science and method conference: Problems of mathematical modeling* (pp. 23-24). Kamianske: DDTU [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 26.04.2024