

УДК 624.154

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.040723.67.986

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ЗВАРЮВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

ПІЛЮГІН Є. Д.¹, *асп.*,

РОТТ Н. О.^{2*}, *канд. техн. наук., доц.*,

МИРОНЕНКО М. А.³, *канд. техн. наук., доц.*,

ДМИТРИЄВ А. В.⁴, *студ.*,

ТВЕРДОХЛІБ О. М.⁵, *ст. викл.*

¹ Кафедра конструювання технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 186-92-00, e-mail: piliuhyn.y.d@nmu.one, ORCID ID: 0000-0002-3639-0085

^{2*} Кафедра конструювання технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (098) 890-24-67, e-mail: rott.n.o@nmu.one, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405

³ Кафедри управління та адміністрування, Науково-навчальний інститут промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 785-06-03, e-mail: myronik2004@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-6316-6778

⁴ Кафедра конструювання технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (068) 554-52-98, e-mail: dmytriiev.ar.v@nmu.one, ORCID ID: 0009-0003-6466-2206

⁵ Кафедра конструювання технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 189-88-14, e-mail: tverdokhlib.o.m@nmu.one, ORCID ID: 0000-0002-1826-3664

Анотація. Постановка проблеми. Зварювання – один із найбільш поширених та ефективних способів з'єднання металевих конструкцій, який застосовується в багатьох галузях виробництва, від автомобільної до нафтової промисловості. Однак у процесі зварювання з'єднання піддаються значним термічним та механічним навантаженням, що може спричинити появу дефектів та зниження механічних властивостей зварних з'єднань.

Основна частина. Моделювання впливу режимів зварювання може бути проведено за допомогою різних методів, таких як математичне моделювання на основі законів фізики та механіки, експериментальні дослідження зварних з'єднань та їх аналіз, або комбінація цих методів. В основному можна застосувати методи кінцевих елементів, метод граничних елементів, метод скінченних різниць та метод гібридного моделювання, де для кожного окремого елемента впливу на зварювання застосовується найбільш ефективний метод математичного моделювання. Розглянуто, яким програмним забезпеченням можна оперувати у створенні математичної моделі. Проаналізовано методи експериментальних досліджень, якими користуються для визначення механічних властивостей зварного з'єднання. Також проаналізовано методи порівняння експериментальних даних з математичною моделлю. **Висновки.** Розглянуто основні методи математичного моделювання зварювання, методи експериментальних досліджень та порівняння отриманих даних математичної моделі з проведеними дослідженнями. На основі порівняння можна дізнатися, як той чи інший режим зварювання впливатиме на якість зварного з'єднання.

Ключові слова: металеві конструкції; зварювання; математична модель; метод кінцевих елементів; метод граничних елементів; метод скінченних різниць

MODELLING THE INFLUENCE OF WELDING MODES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS

PILIUGIN Yev.D.¹, *Postgraduate Stud.*,

ROTT N.O.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

MYRONENKO M.A.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

DMYTRIYEV A.V.⁴, *Stud.*,

TVERDOKHLIB O.M.⁵, *Sen. Lect.*

¹Engineering and Generative Design Department, Dnipro University of Technology, 19, D. Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49057, Ukraine, tel +38 (095) 186-92-00, e-mail: piliuhyn.y.d@nmu.one, ORCID ID: 0000-0002-3639-0085

^{2*}Engineering and Generative Design Department, Dnipro University of Technology, 19, D. Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49057, Ukraine, tel +38 (098) 890-24-67, e-mail: rott.n.o@nmu.one, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405

³Department of Management and Administration, Institute of Industrial and Business Technologies Ukrainian State University of Science of Technologies, 4, Naharin Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (095) 785-06-03, e-mail: mironik2004@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-6316-6778

⁴Engineering and Generative Design Department, Dnipro University of Technology, 19, D. Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49057, Ukraine, tel +38 (068) 554-52-98, e-mail: dmytriyev.ar.v@nmu.one, ORCID ID: 0000-0002-3639-0085

⁵ Engineering and Generative Design Department, Dnipro University of Technology, 19, D. Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49057, Ukraine, tel +38 (096) 189-88-14, e-mail: tverdokhlib.o.m@nmu.one, ORCID ID: 0000-0002-3639-0085

Abstract. Introduction. Welding is one of the most common and effective methods of joining metal structures, which is used in many industries, from the automotive to the oil industry. However, in the process of welding, the joints are subjected to significant thermal and mechanical loads, which can lead to defects and a decrease in the mechanical properties of welded joints. **The main part.** Modelling the influence of welding modes can be performed using various methods, such as mathematical modelling based on the laws of physics and mechanics, experimental studies of welded joints and their analysis, or a combination of these methods. Basically, finite element methods, boundary element method, finite difference method, and hybrid modelling method can be applied, where, for each individual element of influence on welding, the most effective method of mathematical modelling is used. It is considered what software can be used for modelling a mathematical model. The methods of experimental research used to determine the mechanical properties of a welded joint are analyzed. The methods of comparing experimental data to the mathematical model are also analyzed. **Conclusions.** The basic methods of mathematical modelling of welding, methods of experimental research, and comparison of the obtained data of the mathematical model with the conducted research have been considered. Based on the comparison, it is possible to find out how a particular welding mode will affect the quality of the welded joint.

Keywords: *metal structures; welding; mathematical model; finite element method; boundary element method; finite difference method*

Постановка проблеми. Зварювання – один із найбільш поширених та ефективних способів з'єднання металевих конструкцій, який застосовується в багатьох галузях виробництва, від автомобільної до нафтової промисловості. Однак у процесі зварювання з'єднання піддаються значним термічним та механічним навантаженням, що може спричинити появу дефектів та зниження механічних властивостей зварних з'єднань.

Моделювання впливу режимів зварювання на механічні властивості зварних з'єднань стає все більш актуальною темою для досліджень у галузі матеріалознавства та металургії. Воно дозволяє передбачити механічні властивості зварного з'єднання на основі врахування впливу термічного циклу зварювання та механічних властивостей матеріалу.

Стаття присвячена дослідженню методів моделювання впливу режимів зварювання на механічні властивості зварних з'єднань.

Основна частина. Моделювання впливу режимів зварювання – це процес розроблення математичної моделі, що дозволяє прогнозувати фізичні та механічні

властивості зварних з'єднань залежно від параметрів зварювання. Параметри зварювання охоплюють: величину та полярність струму, діаметр електрода, швидкість зварювання, розмір поперечного коливання електрода [1]. Для кожного режиму зварювання існують оптимальні значення параметрів, які забезпечують максимальну міцність та мінімальну деформацію зварного з'єднання.

Моделювання впливу режимів зварювання може бути проведене за допомогою різних методів, таких як математичне моделювання на основі законів фізики та механіки, експериментальні дослідження зварних з'єднань та їх аналіз або комбінація цих методів.

Отримані моделі можуть бути використані для прогнозування властивостей зварних з'єднань та оптимізації параметрів зварювання для досягнення бажаних властивостей з'єднання. Крім того, моделі можуть бути використані для аналізу впливу різних чинників на якість зварного з'єднання, що дозволяє зробити

висновки про оптимальні параметри зварювання в різних умовах.

Математичне моделювання зварювання – це процес створення математичної моделі, яка дозволяє прогнозувати фізичні та механічні властивості зварних з'єднань залежно від параметрів зварювання.

Моделювання зварювання може бути здійснене за допомогою різних методів, таких як:

1. Метод скінченних елементів (Finite Element Method, FEM) – це метод чисельного аналізу, який дозволяє моделювати складні геометричні форми та визначати розподіл напружень і деформацій у зварних з'єднаннях [2–4].

2. Метод граничних елементів (Boundary Element Method) – заснований на моделюванні впливу граничних умов на поверхні зварювання, без необхідності розв'язування диференціальних рівнянь в області зварювання [5–7].

3. Метод скінченних різниць (Finite Difference Method, FDM) – дозволяє моделювати теплові та механічні процеси зварювання та визначати розподіл напружень та деформацій у зварних з'єднаннях [8; 9].

4. Метод гібридного моделювання – поєднує в собі різні методи математичного моделювання та дозволяє досягти більш точних результатів.

Математичні моделі, отримані за допомогою цих методів, дозволяють прогнозувати розподіл температури, деформації та напруження у зварних з'єднаннях, а також визначати оптимальні параметри зварювання для досягнення необхідних властивостей з'єднання. Розглянемо кожен метод окремо.

- Метод скінченних елементів (Finite Element Method, FEM) – це загальний чисельний метод розв'язування диференціальних рівнянь у частинних похідних у двох або трьох просторових змінних (тобто деяких крайових задач) [10].

Метод скінченних елементів застосовується для розв'язання рівнянь теплопереносу, механіки деформованого стану, механіки руйнування та інших

фізичних процесів, які відбуваються під час зварювання.

Основна перевага методу скінченних елементів – можливість моделювання складних геометричних форм, а також урахування взаємодії різних фізичних процесів у зварному з'єднанні. Однак для досягнення точних результатів необхідно враховувати багато факторів, таких як рух ковзання та обертання зварювального електрода, вплив іншого обладнання на зону зварювання та інші фактори. Тому моделювання зварювання методом скінченних елементів може бути складним і вимагати значних обчислювальних ресурсів.

- Метод граничних елементів (МГЕ) – метод чисельного аналізу, який застосовується для розв'язання різних задач математичної фізики, зокрема, для моделювання зварювання. У цьому методі геометрична область, що досліджується, поділяється на дві частини – внутрішню і зовнішню, і до зовнішньої частини накладаються граничні умови. За допомогою розв'язку на межі між цими двома областями розв'язується задача для всієї області.

Метод граничних елементів має декілька переваг порівняно з іншими методами математичного моделювання, зокрема, з методом скінченних елементів. Наприклад, він дозволяє врахувати нерівномірний розподіл джерел тепла та нерівномірний розподіл властивостей матеріалу. Крім того, МГЕ дозволяє моделювати задачі зі змінною геометрією, що може бути важливо для розв'язання певних практичних задач, наприклад, у дослідженні процесів зварювання складних конструкцій.

Одна з особливостей МГЕ полягає в тому, що він зазвичай потребує меншої кількості вузлів, ніж метод скінченних елементів. Це означає, що для моделювання складних задач МГЕ може бути більш ефективним з точки зору обчислювальних витрат.

Проте МГЕ також має свої обмеження. Наприклад, для моделювання нерегулярних геометрій, які містять вирізи, складніші

межі, або багатокомпонентні системи, МГЕ може бути менш ефективним.

- Метод скінченних різниць (Finite Difference Method, FDM) – чисельні методи розв'язання інтегро-диференціальних рівнянь алгебри, диференціального, інтегрального числення, оснований на заміні диференціальних операторів різницевидами операторами, інтегралів – сумами, а функцій неперервного аргументу – функціями дискретного аргументу.

У контексті зварювання метод скінченних різниць може бути застосований для розв'язання рівнянь теплопровідності та механіки деформації, які описують процес зварювання. Зазвичай цей метод застосовується для моделювання динаміки зміни температури та напруження в матеріалі під час зварювання.

Метод скінченних різниць вимагає поділу зварювальної ділянки на малий елементарний об'єм, в якому розв'язуються рівняння теплопровідності та механіки деформації. Використання більшої кількості елементів дозволяє отримати більш точні результати моделювання.

Один із найбільш поширених підходів до застосування методу скінченних різниць у моделюванні зварювання – це поділ процесу зварювання на послідовні етапи, такі як нагрівання, переміщення зварювальної голки, зварювання та охолодження. Для кожного етапу рівняння теплопровідності та механіки деформації розв'язуються окремо з урахуванням умов на межах.

Метод скінченних різниць має свої обмеження, які можуть вплинути на точність результатів моделювання. Один із найбільш значущих обмежень – необхідність використання досить малого розміру елементів для забезпечення точності. Це може спричинити значне збільшення кількості обчислювальних елементів, які вимагаються для розв'язання складних задач.

Крім того, метод скінченних різниць не дозволяє врахувати вплив деяких факторів, таких як нерівномірний розподіл теплових джерел та нерівномірний розподіл

властивостей матеріалу. Це зумовить неточність результатів моделювання та потреби застосування додаткових методів, таких як метод скінченних елементів. Ще один важливий аспект застосування методу скінченних різниць – необхідність урахування правильних граничних умов. Правильне визначення граничних умов може значно вплинути на точність результатів моделювання та вимагати додаткового дослідження та аналізу.

Попри ці обмеження, метод скінченних різниць залишається одним із найбільш поширених та потужних інструментів для моделювання процесів зварювання. Він дозволяє досліджувати різні аспекти процесу зварювання, такі як розподіл температури, зміщення, напруження та деформації, та забезпечує можливість удосконалення технологій зварювання та поліпшення якості зварних з'єднань.

- Метод гібридного моделювання (або комбінованого моделювання) являє собою підхід до моделювання процесів зварювання, що поєднує різні методи, наприклад, метод скінченних елементів, метод скінченних різниць, метод граничних елементів тощо.

Основна ідея полягає в тому, щоб використовувати кожен метод для розв'язання тих аспектів процесу зварювання, для яких він найбільш ефективний, а потім комбінувати отримані результати. Наприклад, метод скінченних елементів може бути застосований для моделювання термічного поля та деформації, тоді як метод обмеження мінімального енергетичного потенціалу може допомогти врахувати вплив пластичної деформації на мікроструктуру матеріалу.

Однак метод гібридного моделювання теж має деякі обмеження, зокрема, вимагає високої кваліфікації спеціалістів та великої кількості обчислювальних ресурсів. Крім того, для комбінованого підходу необхідно визначити правильний порядок застосування різних методів та їх параметрів, що може бути складним завданням.

До програмного забезпечення, яким можна створювати математичну модель, можна віднести безліч програм від багатьох виробників, тому що метод кінцевих елементів використовують майже в усіх програмах з 3-D моделювання та розрахункових пакетах. Проте не всі ці програми можуть у сумі дати хороший результат, через усілякі похибки вимірювання, і в кінцевому рахунку після використання по черзі різних пакетів розрахунків можна отримати велику похибку. Тому кращим варіантом буде користуватися тим програмним забезпеченням, де зібрано більшість необхідних для отримання результату методів математичного моделювання.

Такими програмними пакетами є:

- ANSYS;
- Abaqus;
- SolidWorks Simulation;
- COMSOL Multiphysics;
- MSC Nastran;
- LS-DYNA;
- OpenFOAM.

Усі ці програмні пакети для розрахунків містять методи моделювання, котрими можливо точно розробити математичну модель, наближену до експериментальних даних. Для попереднього розрахунку можна користуватися і тим програмним забезпеченням, що не вимагає дорогої ліцензії чи не має тих чи інших розрахункових методів, наприклад, Autodesk Inventor. Такий метод буде корисний, якщо потрібно розрахувати один із параметрів, не вглиблюючись у точну математичну модель.

У своїх роботах для розрахунку навантаження саме Autodesk Inventor ми і користуємось, і на виході маємо наближені до реальних дані, які можна використовувати для подальших дій.

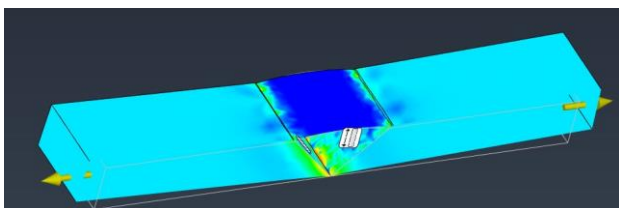


Рис. 1. Експеримент з розтягуванням зразка зварного з'єднання в Autodesk Inventor

Для повної математичної моделі у своїх розрахунках ми користуємось програмним пакетом ANSYS.

ANSYS – програмне забезпечення, створене компанією ANSYS, Inc.. Пакет дозволяє розв'язувати широке коло задач в галузі міцності, тепла, гідрогазодинаміки, електромагнетизму, а також міждисциплінарного аналізу, що об'єднує всі чотири галузі; дозволяє проводити оптимізацію конструкції на основі всіх перерахованих типів аналізу. Це доволі складна система для вивчення, проте охоплює весь спектр розрахунків моделі і надає повний аналіз, як буде себе поводити матеріал у процесі зварювання.

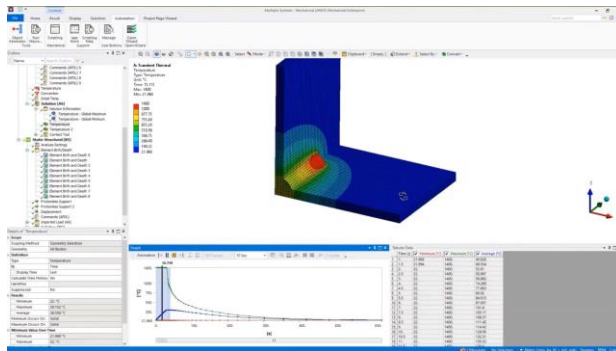


Рис. 2. Розподіл зони нагріву зварного з'єднання зразка в ANSYS

Маючи математичну модель, можна порівняти її з експериментальними даними, які можна отримати, провівши низку експериментів, а саме:

– руйнівні методи контролю. Ці методи полягають у тому, що зразок зварного з'єднання піддається дії розтягу або стиску, і вимірюється значення сили, яка необхідна для розриву або зміщення зразка. На основі цих даних можна визначити механічні властивості звареного з'єднання, такі як міцність, пластичність, жорсткість тощо;

– неруйнівний метод контролю, який дозволяє оцінювати властивості матеріалів звареного з'єднання, не пошкоджуючи його. Наприклад, можна використовувати методи візуального контролю (мікроскопія, макроскопія), магнітопорошковий контроль, ультразвуковий контроль, радіографію та інш.

Висновки

Розглянуто основні методи математичного моделювання зварювання, методи експериментальних досліджень та порівняння отриманих даних математичної

моделі з проведеними дослідженнями. На основі порівняння можна дізнатися, як той чи інший режим зварювання впливатиме на якість зварного з'єднання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вибір розрахунку режиму зварювання. URL: https://gradient.ua/index.php?route=cyberstore/article&cs_news_article_id=61
2. Anca Andrés, Cardona Alberto, Risso José, Fachinotti Víctor D. Finite element modeling of welding processes. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X10002751>
3. Wen S. W., Hilton P., Farrugia D. C. J. Finite element modelling of a submerged arc welding process. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013601009451>
4. Joshi Gaurav, Shahi A. S. Prediction of angular distortion in austenitic stainless steel welds using finite element analysis. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322024270>
5. Ma H., Deng H. L. Nondestructive determination of welding residual stresses by boundary element method. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965997898000519>
6. Hang Ma, Okada A. Computation of GMAW welding heat transfer with boundary element method. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096599789390022L>
7. Mashiri F. R., Zhao Xiao-Ling, Grundy P. Crack propagation analysis of welded thin-walled joints using boundary element method. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s004660000163>
8. AL-SA'ADY Moneer H., ABDULSATTAR Mudar A., AL-KHAFAGY Laith S. Finite difference simulation of low carbon steel manual arc welding. URL: <https://doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2011/0354-98361000055S.pdf>
9. Thompson Joel Timothy Modeling ptfе welding to reduce cycle times: finite difference method for 2-d transient heat conduction. URL: https://hammer.purdue.edu/articles/thesis/MODELING_PTFE_WELDING_TO_REDUCE_CYCLE_TIMES_FINITE_DIFFERENCE_METHOD_FOR_2-D_TRANSIENT_HEAT_CONDUCTION/8300612
- 10 Finite element method. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method

REFERENCES

1. *Vybir rozrakhunku rezhymu zvaryvannya* [Selecting the calculation of the welding mode]. URL: https://gradient.ua/index.php?route=cyberstore/article&cs_news_article_id=61. (in Ukrainian)
2. Anca Andrés, Cardona Alberto, Risso José and Fachinotti Víctor D. Finite element modeling of welding processes. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X10002751>
3. Wen S.W., Hilton P. and Farrugia D.C.J. Finite element modelling of a submerged arc welding process. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013601009451>
4. Joshi Gaurav and Shahi A.S. Prediction of angular distortion in austenitic stainless steel welds using finite element analysis. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322024270>
5. Ma H. and Deng H.L. Nondestructive determination of welding residual stresses by boundary element method. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965997898000519>
6. Hang Ma and Okada A. Computation of GMAW welding heat transfer with boundary element method. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096599789390022L>
7. Mashiri F.R., Zhao Xiao-Ling and Grundy P. Crack propagation analysis of welded thin-walled joints using boundary element method. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s004660000163>
8. AL-SA'ADY Moneer H., ABDULSATTAR Mudar A. and AL-KHAFAGY Laith S. Finite difference simulation of low carbon steel manual arc welding. URL: <https://doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2011/0354-98361000055S.pdf>
9. Thompson Joel Timothy Modeling ptfе welding to reduce cycle times: finite difference method for 2-d transient heat conduction. URL: https://hammer.purdue.edu/articles/thesis/MODELING_PTFE_WELDING_TO_REDUCE_CYCLE_TIMES_FINITE_DIFFERENCE_METHOD_FOR_2-D_TRANSIENT_HEAT_CONDUCTION/8300612
- 10 Finite element method. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method

Надійшла до редакції: 23.04.2023.