

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ

К. К. Трунін, магістр

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. Досліджено вплив способу задання теплофізичних властивостей матеріалу на точність визначення температурних полів при комп'ютерному моделюванні дугового зварювання із застосуванням методу скінченних елементів у середовищі ANSYS. Наведено результати розрахунку температурних полів, отриманих за теорією М.М. Рикаліна, комп'ютерним моделюванням із застосуванням методу скінченних елементів та експериментально.

Ключові слова: метод скінченних елементів, комп'ютерне моделювання, автоматичне зварювання, температурні поля.

Аннотация. Исследовано влияние способа задания теплофизических свойств материала на точность определения температурных полей при компьютерном моделировании дуговой сварки с применением метода конечных элементов в среде ANSYS. Приведены результаты расчета температурных полей, полученных по теории Н.Н. Рыкалина, компьютерным моделированием с применением метода конечных элементов и экспериментально.

Ключевые слова: метод конечных элементов, компьютерное моделирование, автоматическая сварка, температурные поля.

Abstract. The influence of material thermophysical features representation on the accuracy of the temperature fields definition under the arc welding computer simulation using the finite elements method in ANSYS environment has been analyzed. The results of the temperature fields calculation are shown where the fields were obtained according to Rykalin theory, by the computer simulation using the finite elements method and experimentally.

Keywords: finite elements method, computer simulation, automatic welding, temperature fields.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Одним з перспективних напрямків сучасних досліджень зварювальних технологій є моделювання із застосуванням методу скінченних елементів (МСЕ). Комп'ютерне моделювання процесу розповсюдження тепла при наплавленні валика на пластину показало [3], що відхилення отриманих моделюванням термоциклів на віддаленні від осі шва є досить малим і не перевищує 5...10%. Проте максимальна глибина проплавлення, отримана моделюванням та обмежена ізотермою $T = T_s = 1500$ °С, відрізняється від визначеної експериментально в 2,47 разу (рис. 1), що пов'язано з неврахуванням залежності теплофізичних властивостей матеріалу від температури та потребує уточнення комп'ютерної моделі.

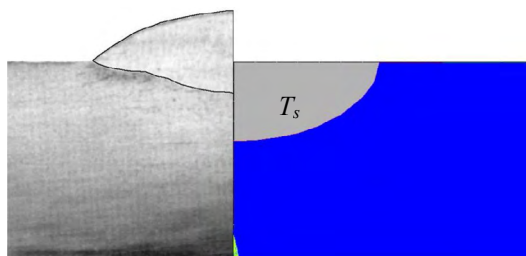


Рис. 1. Порівняння поля температур, отриманого комп'ютерним моделюванням, з макрошліфом наплавки (матеріал – Ст3)

Уточнення процесу розповсюдження тепла для зон зварного з'єднання зі сталей, нагрітих вище температури втрати пружних властивостей (600 °С), є першим кроком до визначення напружено-деформованого стану (НДС) конструкції, тому підвищення точності комп'ютерного моделювання температурних полів при зварюванні з використанням МСЕ є *актуальною задачею*.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ
ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Комп'ютерне моделювання виконано на базі однієї з найбільш відомих та розповсюджених програмних систем скінченноелементного моделювання – ANSYS. Відомо про застосування МСЕ для розрахунку напружено-деформованого стану з'єднань різномірних матеріалів при дифузійному зварюванні та паянні [4, 9].

Закордонні дослідники досить широко застосовують аналіз за допомогою МСЕ при зварюванні плавленням не тільки для моделювання НДС простих конструкцій [11], але й для зварювання із закріпленням [15], багатопрохідного зварювання товстостієвих труб із нержавіючої сталі [14] та навіть для аналізу залишкових зварювальних напружень після часткового видалення матеріалу конструкції [13]. Таким чином, підвищення точності комп'ютерного моделювання

температурних полів із застосуванням МСЕ є перспективним напрямом дослідження процесу зварювання за умови розробки адекватної методики моделювання.

МЕТА СТАТТІ – підвищити точність комп'ютерного моделювання температурних полів пластини при дуговому зварюванні та наплавленні із застосуванням МСЕ в області високих температур шляхом урахування залежності теплофізичних властивостей матеріалу від температури.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Програмний комплекс ANSYS дає змогу задавати теплофізичні властивості матеріалу незалежними або залежними від температури, а також урахувати втрати енергії на фазові перетворення матеріалу. Точність моделювання буде підвищуватися при наближенні теплофізичних властивостей матеріалу до реальних.

Шляхом комп'ютерного моделювання розв'язано три варіанти температурної задачі (ВТЗ) з різними властивостями матеріалу (табл. 1) і результати порівняно з аналітичними розрахунками [5] та експериментальними даними [3].

Таблиця 1. Вихідні дані для різних ТЗ

Номер ВТЗ	Теплопровідність λ , Вт/(м·К)	Теплоємність c , Дж/кг ³	Густина ρ , кг/м ³
1	38	660	7870
2	λ_{cp} (табл. 2)	c_{cp} (табл. 2)	7870
3	λ_{cp} (табл. 2)	Замінено ентальпією (табл. 2)	

У першому ВТЗ використано теплофізичні властивості, які не залежать від температури, у другому – теплоємність та теплопровідність, які залежать

від температури, а в третьому замість теплоємності використано ентальпію, що дає змогу врахувати перерозподіл теплової енергії в області зварного шва за рахунок зміни агрегатного стану металу.

До особливостей уточненої комп'ютерної моделі (рис. 2) можна віднести те, що матеріал пластини моделюється скінченним елементом типу solid 70, а поверхні теплообміну 3 та 4 – скінченним елементом типу surface 152.

При комп'ютерному моделюванні для спрощення математичної моделі (див. рис. 2) та зменшення витрат машинного часу прийняті наступні припущення: 1) через симетричність теплової задачі відносно площі 1, що проходить крізь вісь зварного шва, моделюється тільки половина пластини (ефективна теплова потужність q зменшена вдвічі); 2) передача теплоти здійснюється через прямокутну пляму нагріву 2; 3) тепловий потік через пляму нагріву постійний по всій площі; 4) початкова температура пластини дорівнює 20 °С.

В уточненій моделі додано валик наплавленого металу 5 з урахуванням теплообміну на його поверхні, при цьому пляма нагріву рухається по поверхні пластини.

Залежність теплофізичних властивостей від температури, за різними джерелами [2, 6–8, 12], відрізняється несуттєво, тому для розв'язання температурної задачі з температурозалежними теплофізичними властивостями матеріалу взято середньозважені значення властивостей c_{cp} та λ_{cp} (табл. 2). Знаком « \leftrightarrow » у табл. 2 показано відсутність значень теплофізичних властивостей у зазначених джерелах інформації, а при виході температури за діапазон визначених теплофізичних властивостей (c_{cp} при $T > 1700$ °С та λ_{cp} при $T > 1200$ °С) їх значення взято незмінним.

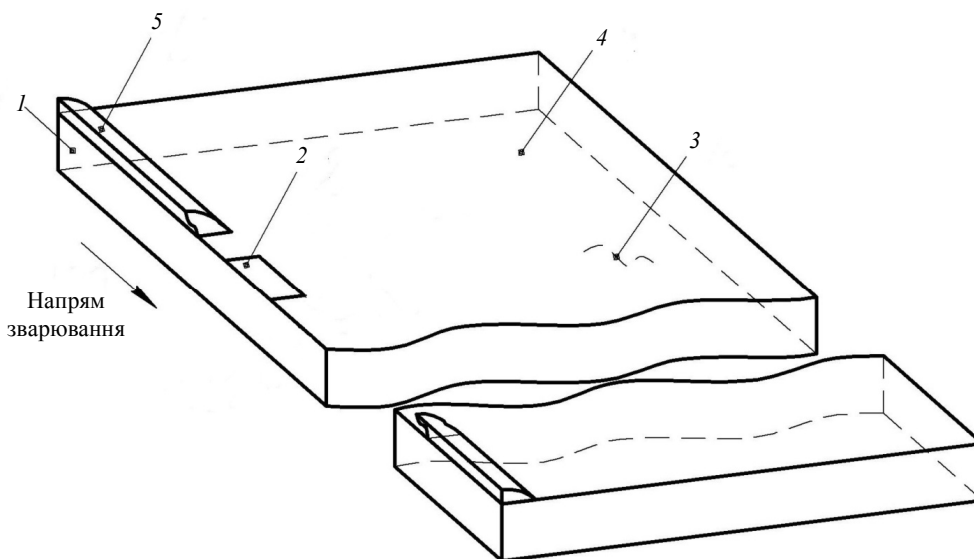


Рис. 2. Комп'ютерна модель температурної задачі з урахуванням наплавленого металу: 1 – площа симетрії, що проходить через вісь шва; 2 – пляма нагріву; 3, 4 – поверхні теплообміну; 5 – наплавлений валик

Таблиця 2. Залежність теплофізичних властивостей маловуглецевої низьколегованої сталі від температури

T, °C	c, Дж/кг ³ , за [2, 6–8, 12]		c _{сп} , Дж/кг ³	λ, Вт/(м·К), за [2, 6–8, 12]		λ _{сп} , Вт/(м·К)	H·10 ⁻⁹ , Дж/м ³
	min	max		min	max		
0	432	435	433	57,1	58,0	57,6	0,00
100	470	497	483	50,7	54,4	52,1	0,36
200	512	530	522	47,3	48,5	47,9	0,76
300	554	566	561	44,0	48,7	46,0	1,18
400	600	620	609	40,7	42,1	41,4	1,64
500	662	685	672	37,4	42,8	40,6	2,15
600	748	841	773	34,0	36,0	35,0	2,71
700	910	1140	995	30,7	35,1	32,4	3,41
750	1327	5000	2132	29,0	29,3	29,1	4,03
800	676	1080	853	27,3	27,4	27,3	4,61
900	649	726	678	26,1	28,1	27,4	5,22
1000	619	693	651	27,3	27,9	27,6	5,74
1100	636	705	661	27,3	27,3	27,3	6,25
1200	650	717	673	27,3	27,3	27,3	6,78
1300	669	728	695	–	–	27,3	7,32
1400	727	740	733	–	–	27,3	7,88
1700	755	835	795	–	–	27,3	11,92
1800	–	–	795	–	–	27,3	12,55
2600	–	–	795	–	–	27,3	17,56
2900	–	–	795	–	–	27,3	69,40
5000	–	–	795	–	–	27,3	82,53

Аналіз плавлення металу є рекурентною процедурою, що враховує зміну фазового стану, а виділена та поглинена теплота розглядається як прихована, через те що зміна температури при цьому незначна або зовсім не спостерігається [10].

Теплові задачі, при яких відбуваються фазові переходи, розв'язуються в нелінійному нестационарному тепловому аналізі, типовими розрахунковими величинами якого є: зміна вузлових температур, тривалість фазового переходу, положення границі розділу між твердою та рідкою фазами. Основною відмінністю теплового нестационарного аналізу від теплового стаціонарного аналізу (за наявності фазового переходу) є необхідність урахування прихованої теплоти.

У програмному комплексі ANSYS прихована теплота не враховується явно за допомогою скінченноелементного формулювання задачі, а вводиться як властивість матеріалу (ентальпія H) та пов'язана з густиною ρ, питомою теплоємністю матеріалу c та температурою T.

Для матеріалу, який не досяг температури плавлення, значення H розраховується як

$$H = \int \rho c dT. \quad (1)$$

Якщо температура матеріалу вища від температури плавлення та нижча від температури випаровування, то рівняння (1) має вигляд

$$H = \Delta H_{пл} + \int \rho c dT,$$

а коли температура виробу перевищує температуру випаровування [10] –

$$H = \Delta H_{пл} + \Delta H_{вип} + \int \rho c dT.$$

Залежність ентальпії від температури розраховано за середньозваженим теплоємності c_{сп} з урахуванням прихованої теплоти плавлення (ΔH_{пл} = 277,56 кДж/кг [1]) та пароутворення заліза (ΔH_{вип} = 6340 кДж/кг [1]) і наведено в табл. 2.

Результати розв'язання температурних задач із температурнезалежними (рис. 3, 4, криві 1), температурозалежними (криві 2) властивостями матеріалу та з використанням ентальпії (криві 3) наведено у вигляді залежностей температури від часу та порівняно з результатами аналітичного розрахунку [5] (криві 4) та експериментального дослідження (криві 5). Через великий обсяг інформації термоцикли наведені тільки для найближчих (8 мм, рис. 3, криві 1–5) та найвіддаленіших (40 мм, рис. 4, криві 1–5) точок від осі шва.

Для кожного ВТЗ виконано порівняння ізотерми T = T_s, отриманої за результатом металографічних досліджень зони проплавлення, з розподілом температури по поперечному перерізу (рис. 5).

Аналіз і порівняння результатів дослідження низькотемпературної області зварного з'єднання (T = 150...600 °C), виконані на основі всіх термоциклів,

показали, що значення похибки температури, визначеної за теорією розповсюдження тепла при зварюванні [5], відносно експериментальної температури змінюється від 5 % ($T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$) до 12 % ($T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$). Подібний характер поведінки має й відносна похибка, визначена за результатами ВТЗ із використанням температуронезалежних властивостей мате-

ріалу. Проте характер відносної похибки, визначеної за результатами ВТЗ із використанням температурозалежних властивостей матеріалу та ВТЗ із використанням ентальпії, різко змінюється. Для цих варіантів відносна похибка в діапазоні дослідження ($T = 150\text{...}600\text{ }^{\circ}\text{C}$) змінюється від 5 % ($T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$) до 1 % ($T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$).

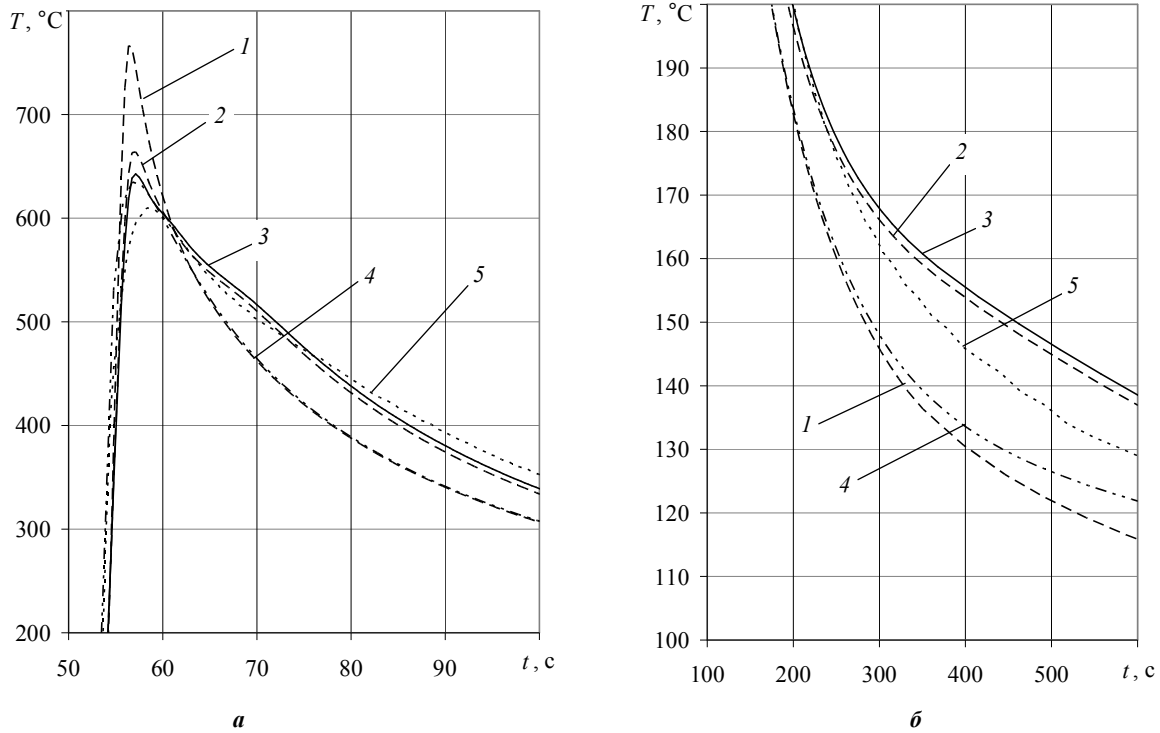


Рис. 3. Високотемпературна (а) та низькотемпературна (б) область термоциклів, отриманих комп'ютерним моделюванням, розрахунком та експериментально для точок, віддалених від осі шва на 8 мм

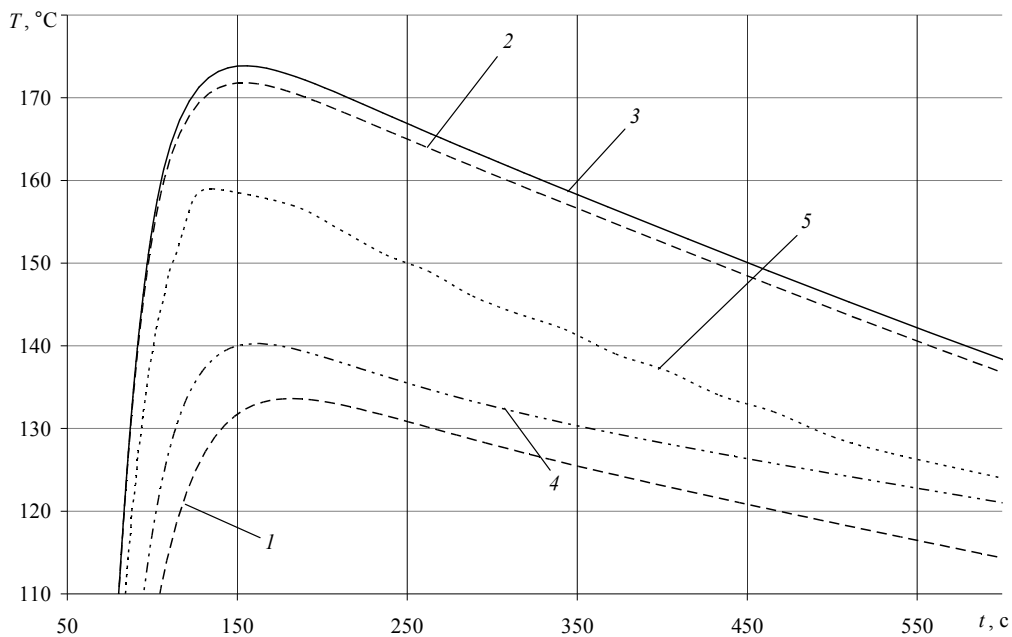


Рис. 4. Термоцикли, отримані розрахунком, експериментально та комп'ютерним моделюванням для точок, віддалених від осі шва на 40 мм

Аналіз і порівняння результатів, виконані на основі розподілу температури в поперечному перерізі (див. рис. 5), показали, що похибка визначення глибини проплавлення для ВТЗ із температуроне-

залежними, температурозалежними властивостями матеріалу та з використанням ентальпії відносно металографічних досліджень складає 34, 22 та 3 % відповідно.

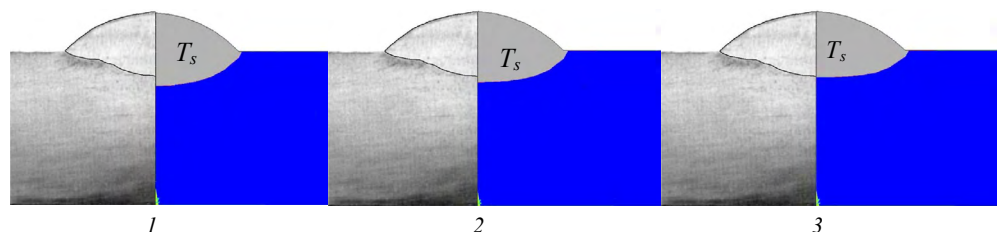


Рис. 5. Ізотерми $T = T_s$ металографічних досліджень (зліва) та комп'ютерного моделювання (справа): 1–3 – див. табл. 1

ВИСНОВОК

Зміна способу задання теплофізичних властивостей при комп'ютерному моделюванні з використанням ANSYS приводить до зниження похибки у визна-

ченні температури при $T = 600$ °C з 12 % (температурозалежні) до 1 % (ентальпія) та зниження відносної похибки значення глибини проплавлення з 34 до 3 % відповідно при $T = T_s$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Железо [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ximuk.ru/encyklopedia/1527.html>.
- [2] **Зиновьев, В. Е.** Теплофизические свойства металлов при высоких температурах [Текст] : справочник / В. Е. Зиновьев. – М. : Металлургия, 1989. – 384 с.
- [3] Комп'ютерне моделювання температурних полів при зварюванні пластин [Текст] / Г. В. Єрмолаєв, А. В. Лабарткава, К. К. Трунін, М. А. Гук // 36. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2012. – № 2. – С. 54–57.
- [4] Оптимизация конструкции металлографитовых подшипников скольжения на основе анализа остаточных напряжений в паяных узлах [Текст] / В. М. Емельянов, В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, А. В. Лабарткава, М. В. Матвиенко // Вестник ХНТУ. – 2009. – № 3(36). – С. 42–46.
- [5] **Рыкалин, Н. Н.** Расчеты тепловых процессов при сварке [Текст] / Н. Н. Рыкалин. – М. : МАШГИЗ, 1951. – 296 с.
- [6] Структура и свойства металлов и сплавов [Текст] : справочник / под ред. Л. Н. Ларикова. – К. : Наук. думка, 1985. – 440 с.
- [7] Таблицы физических величин [Текст] : справочник / под ред. И. К. Киокина. – М. : Атомиздат, 1976. – 1008 с.
- [8] Теплофизические свойства стали [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.termist.com/luo/tabl/sw_wa/sw_wa.htm.
- [9] Формирование остаточных напряжений в торцовых соединениях графита и меди и их влияние на технологию диффузионной сварки и пайки узлов [Текст] / В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, А. В. Лабарткава, М. В. Матвиенко // Вестник ХНТУ. – 2009. – № 3(36). – С. 63–69.
- [10] ANSYS® User Manual [Text] / SAS IP, Inc., 2011.
- [11] **Awang, Mokhtar.** The Effects of Process Parameters on Steel Welding Response in Curved Plates [Text] : Thesis Submitted for the Degree of Master of Science / Mokhtar Awang. – West Virginia, 2002. – 133 p.
- [12] Designers' guide to EN 1991-1-2, 1992-1-2, 1993-1-2 and 1994-1-2. Handbook for the fire design of steel, composite and concrete structures to the eurocodes [Text] / T. Lennon, D. B. Moore, Y. C. Wang, C. G. Bailey. – London : Thomas Telford Publishing, 2007. – 137 p.
- [13] **Liu, C.** Numerical and experimental investigations on the modification of as-welded residual stress after local material removal [Text] / C. Liu, J. Zhang // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 2011. – Vol. 6. – P. 444–455.

- [14] **Liu, C.** Numerical investigation on residual stress distribution and evolution during multipass narrow gap welding of thick-walled stainless steel pipes [Text] / C. Liu, J. X. Zhang, C. B. Xue // Fusion Engineering and Design. – 2011. – Vol. 86. – P. 288–295.
- [15] **Liu, C.** Numerical simulation of transient welding angular distortion with external restraints [Text] / C. Liu, J. X. Zhang // Science and Technology of Welding and Joining. – 2009. – Vol. 14. – P. 26–31.

© К. К. Трунін

Надійшла до редколегії 26.03.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький