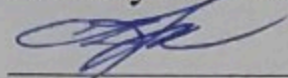


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Кораблебудівний навчально-науковий інститут

Кафедра Зварювального виробництва

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри



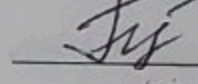
Драган С.В.

«14» 12 2024р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»
(потрібно залишити)

на тему: Розробка веб-інтерфейсу для математичного моделювання температурних полів при зварюванні та наплавленні

Виконав: студент 6121м групи



Галата В.В.

(підпис)

Керівник роботи:

канд. техн. наук, доцент

(посада, науковий ступень вчене звання)



Лабарткава А.В.

(підпис)

Миколаїв – 2024 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Кораблебудівний навчально–науковий інститут

Кафедра ***Зварювального виробництва***

Спеціальність 131 Прикладна механіка

Освітня програма Інжиніринг зварювання та споріднених процесів

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

_____ Драган С.В.
(підпис)

«_ 12 _» ____12____ 2024р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»
(потрібне залишити)

Студенту

Галата Віталій Вікторович

(Прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: ***Розробка веб-інтерфейсу для математичного моделювання температурних полів при зварюванні та наплавленні***

Керівник роботи ***Лабарткава Андрій Володимирович***

Затверджені наказом ректора №_____ від «__» _____ 2024 року

2. Термін подання роботи: 15.12.2024

3. Вихідні дані по роботі: розрахунки теплових процесів при зварюванні – методичні вказівки до виконання курсової роботи

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів): Огляд літератури з розрахунку теплових процесів при зварюванні та наплавленні. Вибір мови програмування для розрахунку теплових процесів при зварюванні та наплавленні. Розробка веб-інтерфейсу для математичного моделювання температурних полів при зварюванні та наплавленні.

5. Перелік презентаційних матеріалів: Веб-інтерфейси розроблених програм, приклад роботи програм, графіки, табличні результати розрахунку теплових процесів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Лабарткава А.В.	15.09.2023	20.11.2024
2	Лабарткава А.В.	15.09.2023	01.12.2024
3	Лабарткава А.В.	15.09.2023	15.12.2024

7. Дата видачі завдання 15.09.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літератури з розрахунку теплових процесів при зварюванні та наплавлені	20.11.2024	
2.	Вибір мови програмування для розрахунку теплових процесів при зварюванні та наплавлені	01.12.2024	
3.	Розробка веб-інтерфейсу для математичного моделювання температурних полів при зварюванні та наплавлені	15.12.2024	

Студент



(підпис)

Галата В.В.

(ПІБ)

Керівник роботи

Лабарткава А.В.

(підпис)

(ПІБ)

АНОТАЦІЯ

Методом комп'ютерного моделювання досліджено поширення тепла під час зварювальних процесів та його вплив на температурне поле навколо зони наплавлення. Розроблено програмне забезпечення на мові JavaScript для розрахунку температурного поля та моделювання термічного циклу.

Показано, що оптимізація зварювальних параметрів дозволяє зменшити ризики утворення дефектів у зварних швах.

Здійснено аналіз температурного впливу на матеріал, включаючи визначення зон розплавлення і термічного впливу, а також побудовано графіки температурного поля з використанням бібліотеки Chart.js.

Ключові слова: зварювання, температурне поле, термічний цикл, зони термічного впливу, моделювання.

ANNOTATION

The method of computer modeling was used to study the heat transfer during welding processes and its effect on the temperature field around the deposition zone.

Software in JavaScript was developed to calculate the temperature field and simulate the thermal cycle.

It was shown that the optimization of welding parameters allows to reduce the risks of defects in welds.

The analysis of the temperature effect on the material was carried out, including the determination of the melting and thermal effect zones, and temperature field graphs were constructed using the Chart.js library.

Keywords: welding, thermal field, thermal cycle, heat-affected zones, modeling.

					КР.131.6121м.04.03.00.ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

Вступ.....	9
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТА НАПЛАВЛЕНІ.....	11
1.1. Аналіз сучасних підходів до розрахунку теплових полів.....	11
1.2. Аналітичні методи розрахунку теплових процесів.....	12
1.3. Чисельні методи розрахунку теплових процесів.....	18
1.4. Емпіричні методи розрахунку теплових процесів.....	20
1.5. Термокінетичні методи моделювання розрахунку теплових процесів...	22
1.6. Огляд програмного забезпечення для розрахунку теплових процесів...	22
Висновки.....	26
РОЗДІЛ 2. ВИБІР МОВИ ПРОГРАМУВАННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТА НАПЛАВЛЕНІ.....	28
2.1. Вибір мови програмування.....	28
2.2. Вибір бібліотеки для створення графіків.....	32
2.3. Опис бібліотеки створення графіків Chart.js.....	34
2.4. Вибір фреймворку для створення веб-інтерфейсу програмного забезпечення.....	37
Висновки.....	38
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ВЕБ-ІНТЕРФЕЙСУ ДЛЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТА НАПЛАВЛЕНІ.....	40
3.1. Розробка програмного забезпечення для розрахунку температурного поля при наплавленні.....	40
3.1.1. Призначення програмного забезпечення для розрахунку температурного поля при наплавленні.....	40
3.1.2. Блок-схема розрахунку програмного забезпечення.....	40
3.1.3. Розрахунок максимальних температур.....	41
3.1.4. Розрахунок термічного циклу.....	42

3.1.5. Розрахунок ефективної теплової потужності.....	43
3.1.6. Веб-інтерфейс програмного забезпечення.....	43
3.1.7. Побудова графіку розподілу температури вздовж лінії зварного шва.....	46
3.2. Розробка програмного забезпечення для розрахунку термічних процесів при напавленні на масивний виріб у зварюванні.....	48
3.2.1. Призначення програмного забезпечення для розрахунку термічних процесів при напавленні на масивний виріб у зварюванні.....	48
3.2.2. Блок-схема розрахунку програмного забезпечення.....	49
3.2.3. Розрахунок максимальних температур.....	51
3.2.4. Розрахунок термічного циклу.....	52
3.2.5. Веб-інтерфейс програмного забезпечення.....	53
3.2.6. Побудова графіку розподілу розподілу максимальної температури вздовж лінії зварного шва.....	58
3.2.7. Побудова графіку розподілу температури вздовж лінії зварювання... ..	59
3.3. Розробка програмного забезпечення для розрахунку температурного поля при зварюванні.....	61
3.3.1. Призначення програмного забезпечення для розрахунку температурного поля при зварюванні.....	61
3.3.2. Блок-схема розрахунку програмного забезпечення.....	61
3.3.3. Розрахунок ефективної теплової потужності.....	63
3.3.4. Розрахунок коефіцієнтів $K_1 \dots K_5$	63
3.3.5. Розрахунок температури у точці (X,Y).....	64
3.3.6. Розрахунок симетричної температури T_1	65
3.3.7. Розрахунок градієнта температури.....	65
3.3.8. Веб-інтерфейс програмного забезпечення.....	66
3.3.9. Побудова графіку розподілу температури вздовж осі X.....	71
3.3.10. Побудова графіку розподілу температури у глибину матеріалу по осі Y.....	72

3.4. Розробка програмного забезпечення для розрахунку термічного циклу точки зони термічного впливу при наплавці.....	73
3.4.1. Призначення програмного забезпечення для розрахунку термічного циклу точки зони термічного впливу при наплавці.....	73
3.4.2. Блок-схема розрахунку програмного забезпечення.....	74
3.4.3. Розрахунок постійних коефіцієнтів.....	75
3.4.4. Розрахунок коефіцієнтів ТК, R0, ТН, ТА, Т, ТАВ.....	76
3.4.5. Веб-інтерфейс програмного забезпечення.....	77
3.4.6. Графік розрахунку термічного циклу точки зони термічного впливу при наплавці.....	80
3.5. Розробка програмного забезпечення для розрахунку термічного циклу точки зони термічного впливу при зварюванні пластин.....	81
3.5.1. Призначення програмного забезпечення для розрахунку термічного циклу точки зони термічного впливу при зварюванні пластин.....	81
3.5.2. Блок-схема розрахунку програмного забезпечення.....	82
3.5.3. Розрахунок постійних коефіцієнтів.....	84
3.5.4. Розрахунок констант К4, К5.....	84
3.5.5. Розрахунок часу охолодження ТК, температури у точці Т.....	85
3.5.6. Веб-інтерфейс програмного забезпечення.....	86
3.5.7. Побудова графіку розрахунку залежності температури від позиції вздовж зварного шва.....	90
Висновки.....	91
Загальні висновки.....	96
Список використаних джерел.....	99

ВСТУП

Сучасна промисловість активно впроваджує технології зварювання та наплавлення, що забезпечують міцність і довговічність металевих з'єднань.

Під час зварювання використовуються концентровані джерела енергії, які локально нагрівають матеріал, спричиняючи складні теплові, структурні та деформаційні процеси. Ці явища суттєво впливають на якість, надійність і експлуатаційні характеристики зварних з'єднань.

Для забезпечення необхідних властивостей зварних з'єднань важливим є контроль і налаштування параметрів зварювального процесу, таких як початкова температура виробу та режими теплового впливу. Теорія теплових процесів, розроблена М.М. Рикаліним [11], дозволяє проводити оцінку цих явищ за допомогою математичного моделювання температурних полів у зоні зварювання.

Проте на практиці впровадження таких розрахунків у сучасних виробничих умовах пов'язане з низкою труднощів. Традиційні методи розрахунку потребують високої кваліфікації, спеціалізованого програмного забезпечення та значних часових витрат. Це зумовлює необхідність створення зручних інструментів, які автоматизують цей процес і роблять його доступним для інженерів із різним рівнем підготовки.

Розробка веб-інтерфейсу для математичного моделювання температурних полів при зварюванні та напавленні спрямована на вирішення цих проблем.

Такий інструмент дозволить: інтерактивно виконувати розрахунки теплових процесів; візуалізувати отримані результати для полегшення аналізу; зробити ці розрахунки доступними через веб-браузер без необхідності встановлення спеціалізованого програмного забезпечення.

Мета даної роботи полягає у створенні веб-інтерфейсу, який поєднує теоретичні основи моделювання температурних полів та сучасні можливості програмування. Це сприятиме підвищенню ефективності технологічних процесів, зниженню витрат і помилок при проектуванні зварювальних виробів.

					КР.131.6121м.04.03.01.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Галата В.В.			Огляд літератури з розрахунку теплових процесів при зварюванні та наплавлені	Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник		Лабарткава А.В						
Консультан						НУК		
Н. Контр.								
Зав. каф.								

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТА НАПЛАВЛЕНІ

1.1. Аналіз сучасних підходів до розрахунку теплових полів

Розрахунок теплових полів є ключовим етапом у вивченні зварювальних процесів, оскільки температурний розподіл у зоні зварювання значною мірою визначає кінцеві властивості зварного з'єднання.

Розуміння характеру температурного розподілу дозволяє прогнозувати механічні характеристики шва, зокрема його міцність і пластичність, а також оцінювати ризик виникнення дефектів, таких як тріщини, усадка чи пори.

Окрім цього, температурні поля впливають на перебіг процесів у зоні термічного впливу, зокрема на фазові перетворення металу, які можуть спричинити зміни структури та властивостей зварного шва.

Сучасні підходи до розрахунку теплових полів значно підвищили точність моделей завдяки розвитку обчислювальних технологій. Завдяки впровадженню чисельних методів, таких як метод кінцевих елементів (МКЕ), стало можливим моделювати процес зварювання з урахуванням реальних умов, зокрема нерівномірного розподілу тепла, складної геометрії зварних швів і варіативності властивостей матеріалів [9].

Такі підходи дозволяють не лише прогнозувати розподіл температури в різних точках зони зварювання, але й враховувати ефекти, пов'язані зі складними формами та конструкціями зварних швів. Наприклад, вони дають змогу оцінити теплові втрати через охолодження, оптимізувати параметри зварювального процесу та мінімізувати ризики виникнення дефектів, таких як перегрів або локальні перегріті зони, що можуть негативно вплинути на міцність і довговічність з'єднання.

Точність розрахунку температурного поля є фундаментом для подальших досліджень, зокрема оцінки механічних напружень, деформацій і фазових перетворень у зоні зварювання. Це, у свою чергу, дозволяє забезпечувати виготовлення високоякісних зварних з'єднань із заданими характеристиками, що має ключове значення для таких галузей, як авіація, суднобудування, енергетика та автомобільна промисловість.

Розвиток комп'ютерного моделювання та впровадження сучасних програмних продуктів, таких як ANSYS, COMSOL, SYSWELD, відкрили можливість не лише розраховувати температурні поля, але й виконувати комплексний аналіз взаємодії теплових і механічних процесів. Це дозволяє ще точніше оцінювати результати зварювання за різних умов. Такий підхід забезпечує глибше розуміння поведінки матеріалу під час зварювання та дає змогу виявляти потенційні проблеми ще на етапі проектування, що значно знижує ризик виникнення дефектів у готових з'єднаннях [6].

Отже, сучасні методи розрахунку теплових полів у зварювальних процесах суттєво вдосконалили розуміння фізичних явищ, що відбуваються в зоні зварювання. Це дає змогу інженерам розробляти оптимізовані технологічні процеси для створення зварних з'єднань високої якості.

1.2 Аналітичні методи розрахунку теплових процесів

Аналітичні методи є одним із ключових підходів для оцінки теплових процесів у зварювальних технологіях. Вони ґрунтуються на розв'язанні диференціальних рівнянь теплопровідності, які описують механізм передачі тепла в матеріалі під впливом джерела нагрівання. Ці методи дозволяють визначити температурний розподіл у зоні зварювання, а також розрахувати важливі параметри, такі як глибина плавлення, розміри зони термічного впливу (ЗТВ) і температурні градієнти [1].

Головною перевагою аналітичних підходів є їхня простота, що робить їх особливо ефективними для попередньої оцінки та аналізу теплових процесів за заданих умов нагрівання. Вони чудово підходять для задач зі спрощеними припущеннями, наприклад, при моделюванні точкових або лінійних джерел тепла, коли матеріал вважається однорідним, а теплові втрати незначними.

Однак аналітичні методи мають певні обмеження. Вони не враховують складних геометричних форм зварних конструкцій, змін фізичних властивостей матеріалу під час нагрівання або фазових перетворень у зоні теплового впливу.

Попри ці недоліки, аналітичні підходи залишаються цінним інструментом для дослідження базових закономірностей теплових процесів у зварюванні та часто

використовуються разом із чисельними методами для підвищення точності результатів.

Аналітичні методи базуються на розв'язанні рівнянь теплопровідності з урахуванням умов нагрівання та охолодження металу.

Ці рівняння описують перенесення тепла в матеріалі, враховуючи фактори, як-от інтенсивність нагрівання, швидкість охолодження та початкові температурні умови, що дозволяє отримати температурні поля в зоні зварювання.

- Класичне рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{\rho c_p}$$

де

T - температура, °C;

t - час, с;

α - коефіцієнт теплопровідності, м²/с;

q - джерело тепла, Вт/м³;

ρ - щільність, кг/м³;

c_p - питома теплоємність, Дж/(кг·K);

Для точного розрахунку теплових процесів у зварюванні класичне рівняння теплопровідності є основою для більшості моделей. Оскільки зварювальний процес включає як нагрівання, так і охолодження матеріалу, розв'язання рівняння теплопровідності дозволяє отримати температурні поля в зоні зварювання та визначити ключові параметри, такі як глибина проплавлення, зона термічного впливу та температурні градієнти.

- Метод точкового джерела (Г. Розенталь) [17]

Метод точкового джерела тепла, запропонований Р.М. Розенталем, є одним із найбільш поширених і зручних способів моделювання теплових полів, що виникають під час зварювання, особливо коли використовується точкове джерело тепла, таке як електрична дуга. Цей метод передбачає, що джерело тепла можна представити як ідеалізоване точкове джерело, що спрощує математичне описання теплового поля в зоні зварювання.

Температура в точці, яка знаходиться на відстані r від рухомого точкового джерела тепла, за методом Розенталя обчислюється за такою формулою:

$$T = \frac{q}{2\pi kr} \exp\left(-\frac{vr^2}{2\alpha}\right)$$

де:

- T - температура в точці, що знаходиться на відстані r від джерела,
- q - потужність точкового джерела тепла,
- k - теплопровідність матеріалу,
- v – швидкість переміщення джерела (наприклад, швидкість переміщення зварювальної дуги),
- r – відстань від джерела тепла,
- $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ - теплопровідність, яка залежить від коефіцієнта теплопровідності (k), щільності матеріалу (ρ) та його питомої теплоємності (c_p).

Метод точкового джерела Розенталя [11] дозволяє отримати наближені рішення для температурних полів у зоні зварювання. Це є важливим, оскільки точні чисельні розрахунки, наприклад, за допомогою методу кінцевих елементів (МКЕ), можуть бути дуже ресурсоємними. Використання методу Розенталя дозволяє швидше та ефективніше оцінити температурні поля, що робить його корисним для попередніх аналізів і розрахунків у зварювальних процесах.

Однак метод Розенталя дає досить точні результати для перших наближень, особливо в тих випадках, коли форма та розміри зони зварювання відносно малі, і складну геометрію можна знехтувати. Це дозволяє застосовувати метод для швидких оцінок температурних полів у простих зварних конструкціях, де точність перших наближень є достатньою для подальших розрахунків та аналізу.

Метод ґрунтується на припущенні, що тепловий потік, що надходить у матеріал, можна розглядати як надходження тепла від точкового джерела.

Таким чином, температурне поле довкола такого джерела має радіальну симетрію. Згідно з формулою Розенталя температура швидко зменшується з відстанню від джерела тепла і з часом, коли зварювальний процес триває.

Коли зварювальне джерело переміщається за матеріалом, температура в точці змінюється як функція відстані від джерела та часу. Цим пояснюється експоненційне зниження температури, яке пропорційне $\exp\left(\frac{vr^2}{2a}\right)$.

Це дозволяє моделювати охолодження та швидке поширення тепла в матеріалі, що є важливим для аналізу зон термічного впливу та визначення характеристик зварного шва. Таке моделювання дає змогу оцінити розміри зони термічного впливу, температуру в різних точках шва, а також вплив цих факторів на механічні властивості зварного з'єднання.

Метод Розенталя [17] широко використовується для швидкого аналізу теплових процесів у зварюванні, особливо для точкових та лінійних джерел тепла, таких як лазерне зварювання або зварювання за допомогою дуги. Однак цей метод має кілька обмежень:

1. Спрощення геометрії. Припущення про точкове джерело тепла значно спрощує реальну геометрію зварювання, де джерело часто має більш складну форму, наприклад, лінійну форму електричної дуги. Це може призвести до неточностей у моделюванні температурних полів, оскільки не враховуються взаємодії тепла з усіма частинами зварного шва.

2. Припущення про постійні фізичні властивості. Метод передбачає, що такі фізичні властивості, як теплопровідність, щільність і теплоємність, залишаються сталими під час нагрівання, що не завжди відповідає реальним умовам. При високих температурах матеріал може змінювати свої властивості, що впливає на точність результатів.

3. Лінійна швидкість джерела. Метод припускає лінійну швидкість руху джерела тепла, що не завжди відображає реальну ситуацію. При високих швидкостях переміщення джерела, особливо в складних зварювальних процесах, можуть виникати нелінійні ефекти, такі як перегрів чи нерівномірне охолодження, які не враховуються в цьому підході.

З розвитком обчислювальних методів та програмного забезпечення для чисельних розрахунків, таких як ANSYS, COMSOL та SYSWELD, метод Розенталя

все частіше використовується як початкова наближеність для більш складних моделей. Однак його простота та обчислювальна ефективність зберігають популярність у дослідженнях, пов'язаних із проектуванням процесів зварювання, таких як лазерне зварювання або зварювання з використанням дуги.

- Метод лінійного джерела [2]:

Метод лінійного джерела тепла є важливим підходом для моделювання теплових полів у зварюванні, який застосовується, коли джерело тепла розподілене вздовж лінії, представляючи собою безперервний тепловий потік. На відміну від точкового джерела, цей метод краще відображає реальність для процесів, де зварювання здійснюється дугою, плазмою або лазером, утворюючи шов. Лінійний розподіл тепла дозволяє точніше моделювати температуру в зоні зварювання, зокрема в умовах, коли джерело тепла має лінійну форму, як це відбувається при дуговому, лазерному або плазмовому зварюванні.

Температура в точці на відстані r від лінійного джерела тепла описується рівнянням:

$$T(x, y) = \frac{q}{2\pi k} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{v}{2a}(x - x_0)\right)}{\sqrt{(x - x_0)^2 + y^2}} dx_0$$

де:

- $T(x, y)$ - температура в заданій точці з координатами x та y ,
- q - потужність джерела тепла на одиницю довжини (Вт/м),
- k - коефіцієнт теплопровідності матеріалу,
- v - швидкість переміщення джерела тепла вздовж осі x ,
- $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ - коефіцієнт температуропровідності,
- x_0 - поточна координата точки вздовж осі лінії джерела.

Метод лінійного джерела описує джерело тепла, рівномірно розподілений уздовж лінії зварного шва. Цей підхід більш точно моделює процеси, де довжина області, що нагрівається, значно перевищує її ширину, наприклад, при зварюванні

довгих стиків або великих конструкцій. Температура розподіляється у радіальному напрямі лінії нагріву, а й вздовж довжини зварного шва.

Головна перевага методу лінійного джерела у тому, що він дозволяє враховувати ефект витягнутого нагріву, властивого реальних зварювальних процесів. Це особливо важливо при моделюванні теплових процесів у матеріалах великої довжини чи складної форми.

Особливості температурного розподілу [9]:

1. Радіальна симетрія навколо лінії джерела: температура зменшується зі збільшенням відстані r від лінії джерела. При цьому температурний градієнт вздовж довжини джерела залежить від швидкості зварювання v та теплопровідності матеріалу.

2. Вплив швидкості зварювання: чим вища швидкість зварювання V , тим паче витягнутим стає температурне поле. У цьому випадку ЗТВ стають вужчими та подовженими.

3. Ефект глибини нагріву: за високої потужності лінійного джерела тепла температура проникає на значну глибину, впливаючи на мікроструктуру матеріалу, розміри зони термічного впливу та глибину проплавлення.

Переваги методу лінійного джерела:

1. Простота моделі: метод дозволяє уникнути складних чисельних розрахунків, аналітично описуючи температурне поле.

2. Ефективність для довгих зварювальних швів: модель добре підходить для процесів, де довжина зварного шва значно перевищує ширину зони нагріву.

3. Наближене рішення: метод забезпечує досить точні результати попередніх розрахунків у разі спрощених умов.

Обмеження методу лінійного джерела [4]:

1. Геометричні спрощення: модель передбачає, що джерело тепла розподілено строго по лінії, що може не враховувати локальні зміни інтенсивності нагріву.

2. Постійні властивості матеріалу: метод передбачає, що теплопровідність, щільність та теплоємність залишаються постійними, хоча за високих температур ці параметри можуть істотно змінюватися.

3. Відсутність обліку фазових перетворень: метод лінійного джерела не враховує складних процесів, таких як плавлення, випаровування або фазові перетворення матеріалу.

Застосування методу лінійного джерела:

Метод лінійного джерела тепла широко використовується в розрахунках зон термічного впливу при зварюванні. Він корисний для:

1. Попередній розрахунок розподілу температури вздовж зварного шва.
2. Оцінка розмірів зони термічного впливу.
3. Прогнозування залишкових напруг та деформацій після зварювання.
4. Визначення параметрів процесу, таких як швидкість зварювання та потужність джерела тепла.

1.3 Чисельні методи розрахунку теплових процесів

Використовуються для складних завдань, де аналітичне рішення неможливе:

- Метод кінцевих різниць [14]:

Метод кінцевих різниць — це чисельний підхід до вирішення рівнянь теплопровідності, який широко застосовується для розрахунку теплових процесів у зварюванні завдяки своїй простоті реалізації та можливості адаптації до складних геометрій та умов.

Основна ідея методу полягає в розбитті розрахункової області на дискретну сітку та апроксимації похідних у рівнянні теплопровідності за допомогою різницевої формули.

Це дозволяє наближено розв'язувати рівняння для температури в кожній точці сітки та оцінювати її зміни з часом, що робить метод зручним для аналізу складних зварювальних процесів, де є неоднорідність матеріалу, змінні умови нагрівання чи складна геометрія.

- Метод кінцевих елементів [10]:

МКЕ є одним із найпотужніших та універсальних інструментів для чисельного аналізу теплових процесів у зварюванні. Він застосовується для моделювання складних геометрій, обліку нерівномірних теплових навантажень та аналізу розподілу температури в зоні зварювання та навколишнього металу.

Основна ідея методу полягає в розбитті розрахункової області на кінцеву кількість малих елементів (найчастіше трикутних або тетраедричних) і складання рівнянь для кожного елемента з подальшим їх сукупним рішенням.

Використовує дискретизацію об'єкта на елементи з розрахунком теплових процесів для кожного з них.

МКЕ вирішує класичне рівняння теплопровідності:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

Застосовується для моделювання випадкових процесів теплопередачі, наприклад, за умов турбулентності.

де:

- T - температура, t - час, k - теплопровідність, ρ - плотность материала,
- c_p - питома теплоємність, Q - об'ємне джерело тепла.

Метод дискретизує рівняння, перетворюючи його з безперервної форми в систему алгебри рівнянь, розв'язувану чисельно.

Застосування у зварювальних задачах:

1. Моделювання зон термічного впливу: МКЕ дозволяє точно визначити розміри і форму ЗТВ, що важливо для контролю механічних властивостей шва.

2. Аналіз складних джерел тепла: МКЕ використовується для моделювання дугових джерел, лазерних установок та інших складних джерел з урахуванням їхнього просторового розподілу.

3. Оптимізація процесу зварювання: МКЕ дозволяє досліджувати вплив параметрів зварювання (потужності, швидкості) на температурне поле та мінімізувати дефекти.

4. Інтеграція з механічними розрахунками: розрахунок температурного поля може бути поєднаний з аналізом залишкових напруг та деформацій, що дозволяє оцінити довговічність та якість зварного з'єднання.

Метод кінцевих елементів реалізований у спеціалізованих програмних продуктах:

- ANSYS: Для моделювання теплових процесів з урахуванням пов'язаних механічних деформацій.
- COMSOL Multiphysics: універсальна платформа, що дозволяє моделювати теплові та механічні процеси.
- SYSWELD: програма, спеціалізована для задач зварювання та термічної обробки металів.
- ABAQUS: підходить для комплексного аналізу теплових та механічних завдань.

1.4. Емпіричні методи розрахунку теплових процесів

Емпіричні методи - це підхід, заснований на використанні експериментальних даних для створення розрахункових моделей, які застосовуються для аналізу теплових процесів у зварюванні.

Ці методи доповнюють аналітичні та чисельні підходи, пропонуючи зручні рішення для практичних завдань, де точне моделювання є складним або надмірно ресурсомістким [18].

Основою емпіричних методів є залежності, отримані шляхом обробки експериментальних даних, які зв'язують параметри зварювання з характеристиками теплових полів.

Основні засади емпіричних методів:

1. Використання експериментальних даних

Емпіричні моделі будуються з урахуванням результатів безлічі зварювальних експериментів. Вимірюються параметри, такі як температура у зоні термічного впливу, швидкості охолодження, розміри зварних швів та глибина проплавлення.

Ці дані використовуються для виведення формул чи графічних залежностей.

2. Простота та зручність застосування

Емпіричні методи дозволяють швидко отримати наближені результати без необхідності глибокого занурення у складні математичні розрахунки. Їх часто застосовують на початкових етапах проектування зварювальних процесів.

3. Обмежена застосовність

Моделі, побудовані з урахуванням емпіричних даних, справедливі лише за умов, досліджених експериментах (певні типи матеріалів, діапазони температур, способи зварювання). Вони погано адаптуються до нових умов чи змін геометрії зварних з'єднань.

Класифікація емпіричних методів [6]:

1. Формули, засновані на експериментальних кривих охолодження

Криві охолодження – це графіки залежності температури від часу у різних точках зварного з'єднання. Вони використовуються для виведення математичних залежностей, що описують швидкість охолодження та температуру в зоні термічного впливу.

Для опису температурного поля в зварних з'єднаннях низьковуглецевих сталей використовується залежність:

$$T(h) = T_{\text{макс}} \cdot e^{-k \cdot t}$$

де:

$T(h)$ - температура в момент часу t ,

$T_{\text{макс}}$ - максимальна температура в точці,

k - коефіцієнт охолодження, що залежить від матеріалу та умов теплообміну.

Ці формули дозволяють оцінити швидкість охолодження, що важливо для визначення структури металу та запобігання утворенню дефектів (наприклад, загартованих тріщин) [21].

2. Калібрувальні моделі

Калібрувальні моделі - це емпіричні залежності, що враховують вплив конкретних умов зварювання (потужності джерела тепла, швидкості зварювання, властивостей матеріалу). Вони ґрунтуються на проведенні серії експериментів для різних комбінацій параметрів.

Приклад моделі - глибина проплавлення h та ширина шва ω можуть бути описані емпіричними залежностями:

$$h = C_1 \cdot \frac{P}{V}, \quad \omega = C_2 \cdot \sqrt{\frac{P}{V}}$$

де: P - потужність джерела тепла, V - швидкість зварювання,

					КР.131.6121м.04.03.01.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

C_1, C_2 - емпіричні коефіцієнти, що залежать від матеріалу та методу зварювання.

1.5. Методи термодинамічного моделювання розрахунку теплових процесів

Методи термодинамічного моделювання є важливим інструментом для вивчення теплових процесів та фазових перетворень, що відбуваються у зварювальній зоні [2].

Вони спрямовані на дослідження та прогнозування термічного циклу зварювання, структурних змін у металі та властивостей зон термічного впливу.

Основні аспекти термодинамічного моделювання:

1. Термічний цикл зварювання є залежністю температури від часу в певній точці зварного з'єднання. Він включає три основні стадії: нагрівання, витримку при високій температурі та охолодження.

Термодинамічне моделювання дозволяє:

- Розрахувати розподіл температури у зоні зварювання.
- Визначити швидкість нагрівання та охолодження.
- Прогнозувати вплив температури на структурні зміни металу

2. Фазові перетворення в металі

При зварюванні металів, особливо сталей, важливим аспектом є облік фазових перетворень, таких як переходи аустеніту на ферит, утворення мартенситу або перліту. Ці перетворення залежать від швидкості охолодження, температури та складу матеріалу [19].

1.6. Огляд програмного забезпечення для розрахунку теплових процесів

Для моделювання теплових процесів у зварюванні використовуються різні програмні пакети, які дозволяють точно оцінювати розподіл температур, напружень і фазових перетворень у зоні зварювання. Ось основні з них [10]:

1. ANSYS

Є універсальним інструментом для моделювання термальних та механічних процесів. У зварюванні він дозволяє:

- моделювати розподіл теплових полів, використовуючи МКЕ;

- враховувати залежність властивостей матеріалів від температури;
- прогнозувати механічні напруження та деформації, що виникають під час нагріву та охолодження;

- оцінювати фазові перетворення та їх вплив на структуру матеріалу.

За допомогою ANSYS можна налаштовувати параметри джерела тепла, такі як потужність, розподіл теплового потоку та швидкість переміщення, що робить його особливо корисним для оптимізації складних зварювальних процесів.

2. SYSWELD

Програмне забезпечення спеціалізується на моделюванні зварювання та термічної обробки. Його особливості включають:

- розрахунок зон термічного впливу з високою точністю;
- моделювання зміни мікроструктури металу в результаті фазових перетворень;
- аналіз залишкових напружень та деформацій, що є важливим для контролю якості зварних з'єднань;
- інтеграцію з іншими CAD/CAE-системами для більш ефективного проектування

3. FLOW-3D WELD

Програмне забезпечення може розраховувати теплові поля під час зварювання. Це програмне забезпечення спеціалізується на моделюванні складних фізичних процесів, які супроводжують зварювання, зокрема:

- Моделювання теплового поля:

Програма розраховує розподіл температур у зоні зварювання з високою точністю, враховуючи джерело тепла, його потужність та форму [3].

Враховуються умови теплопередачі, такі як тепловіддача, теплопровідність та випромінювання.

- Динаміка плавильного басейну:

FLOW-3D WELD враховує взаємодію теплового потоку з рідкою та твердою фазами матеріалу.

Аналіз включає формування та рух рідкого металу, викликані тепловими потоками та градієнтами температур [25].

- Тепловий вплив на матеріал:

Програмне забезпечення дозволяє оцінювати зони термічного впливу та прогнозувати їх вплив на мікроструктуру металу.

Розрахунок теплових втрат через охолодження навколишнім середовищем.

- Інтеграція з іншими процесами:

FLOW-3D WELD також моделює явища, пов'язані з випаровуванням, конвекцією в рідкому металі та утворенням ключових отворів, що часто спостерігаються під час лазерного зварювання.

4. Simufact Welding

Програмне забезпечення спеціалізується на моделюванні термомеханічних процесів, які виникають під час зварювання, включаючи:

- Розрахунок розподілу температури: моделювання теплових полів у зоні зварювання з урахуванням джерела тепла, швидкості охолодження і теплового потоку.
- Аналіз термічного циклу: обчислення змін температури у часі, які впливають на утворення зон термічного впливу і мікроструктури матеріалу.
- Вплив теплових полів на механічні властивості: врахування залишкових напружень і деформацій, які виникають через нерівномірний розподіл тепла.

5. COMSOL Multiphysics

Це багатофізична платформа, яка дозволяє моделювати різні фізичні явища, включаючи теплові процеси, що виникають під час зварювання.

Можливості розрахунку теплових полів у COMSOL:

- Теплове розповсюдження:

COMSOL використовує рівняння теплопровідності для моделювання розподілу температури в зоні зварювання.

Програмне забезпечення враховує джерело тепла, його форму та потужність, а також час і швидкість нагріву.

- Робота з складною геометрією:

COMSOL дозволяє створювати тривимірні моделі складних об'єктів, включаючи реальні конструкції зварних швів.

У програмі можна налаштувати форму джерела тепла, наприклад точкове, лінійне чи об'ємне джерело.

- Моделювання охолодження та тепловіддачі:

Враховується охолодження через конвекцію, теплове випромінювання та контакт з іншими матеріалами.

Можна задавати змінні температурні умови та межі, що імітують реальні виробничі умови.

- Інтеграція багатофізичних процесів:

COMSOL дозволяє враховувати не лише теплові поля, але й механічні напруження та фазові перетворення [15].

Інтеграція фізичних процесів дозволяє прогнозувати структурні зміни, деформації та залишкові напруження у зоні зварювання.

- Розширена параметризація:

Програмне забезпечення дає можливість змінювати параметри, такі як швидкість зварювання, теплопровідність матеріалу та потужність джерела тепла.

Можливість оптимізації процесів на основі параметричних досліджень.

- Візуалізація результатів:

Результати моделювання представлені у вигляді кольорових карт розподілу температури, графіків і анімацій, що спрощує аналіз.

6. ABAQUS

Потужна платформа для аналізу складних інженерних задач за допомогою методу кінцевих елементів. Її застосовують для дослідження теплових полів, механічних напружень та деформацій у різних процесах, включаючи зварювання [24].

Основні можливості:

- ABAQUS дозволяє визначати розподіл температури в зварюваній зоні, враховуючи тепловий вплив джерела тепла, охолодження через конвекцію та випромінювання.

- Можна застосовувати рухоме джерело тепла, моделюючи реальний зварювальний процес.

- Програма дозволяє задавати нелінійні залежності термічних і механічних властивостей від температури.

- Програма підтримує аналіз залишкових напружень і деформацій, які виникають через нерівномірне нагрівання та охолодження.

Висновки

У ході аналізу програмного забезпечення, призначеного для розрахунків теплових процесів у зварюванні, було розглянуто такі потужні платформи, як Simufact Welding, ANSYS, COMSOL Multiphysics, FLOW-3D WELD, ABAQUS, та SYSWELD. Ці інструменти забезпечують високий рівень точності та можливість моделювання складних фізичних процесів, однак вони мають кілька суттєвих недоліків:

1. Висока вартість.
2. Складність освоєння.
3. Обмеження для конкретних завдань.

Через зазначені проблеми виникає потреба в створенні більш доступного та гнучкого програмного забезпечення для математичного моделювання теплових процесів при зварюванні та наплавленні.

Для цього необхідно:

- Обрати мову програмування
- Обрати інструмент для побудови інтерактивних графіків
- Обрати метод розрахунку теплових полів
- Розробити програмне забезпечення

Розробка програмного забезпечення для розрахунку теплових процесів у зварюванні забезпечить доступність та гнучкість розрахунків, а також відкриє можливості для адаптації під конкретні завдання, що не завжди можливо із застосуванням комерційного ПЗ. Це дозволить значно знизити витрати та підвищити ефективність розрахунків для досліджень і практичних застосувань.

					КР.131.6121м.04.03.02.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Галата В.В.			Вибір мови програмування для розрахунку теплових процесів при зварюванні та наплавлені	Літ.	Арк.	Аркуші
Керівник		Лабарткава А.В						
Консультан						НУК		
Н. Контр.								
Зав. каф.								

РОЗДІЛ 2. ВИБІР МОВИ ПРОГРАМУВАННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТА НАПЛАВЛЕНІ

2.1. Вибір мови програмування

У процесі розробки програмного забезпечення для розрахунку теплових процесів під час зварювання та наплавлення важливо обрати мову програмування, яка забезпечить баланс між продуктивністю, зручністю використання та доступністю для кінцевих користувачів. Щоб визначити найбільш підходящий інструмент для цих завдань, було проведено детальне порівняння JavaScript з іншими популярними мовами [8].

У таблиці 2.1 наведено ключові аспекти продуктивності кожної з розглянутих мов, що допомагає обґрунтовано вибрати оптимальне рішення для реалізації розробки програмного забезпечення.

Таблиця 2.1. Порівняння мов програмування за критеріями простоти розробки, вартості використання, швидкості виконання, інтерактивності графіків та кросплатформеності

Параметр	JavaScript	Python	C++/C#	MATLAB	Java
Вартість ліцензії	Безкоштовно	Безкоштовно	Безкоштовно/ Платно	Платно	Безкоштовно
Швидкість виконання	Середня	Середня	Висока	Середня	Висока
Інтерактивність графіків	Висока	Висока	Низька	Висока (обмежена GUI)	Середня (JavaFX, Swing)
Швидкість розробки	Висока	Висока	Середня	Висока	Середня
Кросплатформеність	Висока	Висока	Середня (залежить від ОС)	Низька (залежить від ліцензії)	Висока (через JVM)
Можливість роботи у веб-середовищі	Висока	Середня	Низька	Низька	Середня
Спільнота	Величезна	Величезна (наукова)	Середня	Низька	Величезна
Масштабованість	Висока	Висока	Висока	Низька	Висока

Порівняння мов:

- Python - хоч Python і є популярним для наукових обчислень, його виконання потребує встановлення середовища та додаткових бібліотек (NumPy, Matplotlib тощо). Це ускладнює доступ для кінцевих користувачів, особливо якщо програма має бути простою у використанні.
- C++/C# - забезпечують високу продуктивність, але розробка графічного інтерфейсу складніша, а також потрібне компілювання під конкретну ОС.
- Java - має подібну до JavaScript кросплатформеність, але програми, написані на Java, потребують встановлення JVM (Java Virtual Machine), що ускладнює їх запуск для звичайних користувачів.
- MATLAB - підходить для математичних обчислень, але висока вартість ліцензії робить його менш доступним для широкого використання..

Висновок: для реалізації програмного забезпечення було обрано JavaScript через його простоту використання, кросплатформеність і інтерактивність, що забезпечує доступність для кінцевих користувачів.

Цей вибір зумовлений її численними перевагами над іншими мовами програмування, як з точки зору технічної реалізації, так і зручності використання кінцевими користувачами:

1. Кросплатформеність і доступність

JavaScript є однією з найпопулярніших мов програмування у світі, яка працює у будь-якому сучасному веб-браузері. Це забезпечує миттєву доступність програми для широкого кола користувачів без необхідності встановлення додаткового програмного забезпечення. Користувачі можуть запустити програму безпосередньо в браузері, незалежно від операційної системи (Windows, macOS, Linux, Android, iOS), що суттєво спрощує розповсюдження та використання програми.

Додатково прогресивні веб-додатки (PWA) на основі JavaScript можуть працювати офлайн, що дає змогу розширити доступність програмного забезпечення у промислових умовах, де немає постійного доступу до інтернету.

					КР.131.6121м.04.03.02.ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

2. Зручність для інтерактивної візуалізації

JavaScript має потужні бібліотеки для створення інтерактивних графіків та візуалізацій, такі як D3.js, Chart.js, Plotly та інші. Це дозволяє легко реалізувати побудову графіків температурного поля та термічного циклу, що є ключовою частиною функціоналу розробленого програмного забезпечення. Інтерактивність візуалізацій, така як масштабування графіків, наведення для отримання точних даних та динамічне оновлення, значно покращує користувацький досвід [5].

Інтерактивність графіків дозволяє:

- Масштабувати графіки.
- Отримувати точні дані за наведенням курсора.
- Динамічно оновлювати дані на основі нових розрахунків.

Впровадження візуалізації з використанням WebGL дозволяє створювати тривимірні моделі для більш детального аналізу теплових процесів.

3. Можливість роботи у веб-середовищі

JavaScript інтегрується з HTML і CSS, що дозволяє створювати зручний веб-інтерфейс для введення параметрів зварювання, відображення результатів у табличній формі та збереження даних. Інтерфейс на основі веб-технологій виглядає сучасно, зручно та зрозуміло для користувачів.

Більше того, програма може бути легко інтегрована у внутрішні системи підприємств через локальні або хмарні сервери.

Використання REST API дозволяє обмінюватися даними між клієнтом і сервером, інтегруючи ПЗ у більші корпоративні системи для моніторингу теплових процесів у реальному часі.

4. Швидкість розробки

JavaScript відомий своєю простотою у вивченні та реалізації завдань.

Наявність великої кількості готових бібліотек і фреймворків дозволяє значно скоротити час розробки. Наприклад:

- Для обчислень і роботи з математичними формулами можна використовувати Math.js.

					КР.131.6121м.04.03.02.ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

- Для розробки адаптивного інтерфейсу - Bootstrap або Tailwind CSS.
- Для управління даними - Lodash.

5. Гнучкість у розрахунках

JavaScript добре підходить для реалізації математичних обчислень завдяки своїм потужним вбудованим функціям і математичним бібліотекам:

- Numeric.js – для роботи з матрицями.
- TensorFlow.js – для обробки даних за допомогою методів машинного навчання, що може бути корисним для прогнозування теплових процесів.

Хоча JavaScript не є найпоширенішою мовою для наукових обчислень, вона достатньо швидка для завдань середнього рівня складності, таких як розрахунок температурних полів і термічних циклів.

Завдяки використанню Node.js JavaScript може виконувати обчислення не лише на стороні клієнта, але й на стороні сервера, що дозволяє масштабувати рішення при роботі з великими обсягами даних.

6. Широка підтримка і ком'юніті

JavaScript має величезну спільноту розробників, які постійно створюють і вдосконалюють бібліотеки, фреймворки та інструменти. Завдяки цьому можна легко знайти рішення для будь-якої проблеми, що виникає під час розробки.

Крім того, велика кількість документації та навчальних матеріалів робить JavaScript ідеальним вибором для розробників будь-якого рівня [14].

7. Масштабованість і інтеграція

Програмне забезпечення, написане на JavaScript, легко інтегрується з іншими веб-додатками та сервісами. Наприклад, результати розрахунків можна передавати до хмарних баз даних або використовувати API для обміну інформацією з іншими системами. Це дозволяє створювати масштабовані системи, які можна використовувати в комплексі з іншими технологіями на підприємствах.

Програмне забезпечення на основі JavaScript легко інтегрується з хмарними сервісами для зберігання даних, такими як AWS, Google Cloud, Microsoft Azure.

Інтеграція через GraphQL або gRPC спрощує доступ до великих масивів даних і робить систему масштабованою для використання в промислових умовах.

					КР.131.6121м.04.03.02.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

8. Майбутній потенціал

JavaScript постійно розвивається, і з появою нових фреймворків та інструментів, таких як Svelte, React або Vue.js, розширюється його можливість для розробки складних додатків. Це гарантує довговічність створеного ПЗ та простоту його модернізації в майбутньому.

JavaScript має всі необхідні інструменти для створення гнучких і довговічних рішень для інженерних розрахунків у зварювальній промисловості [14].

2.2. Вибір бібліотеки для створення графіків

Для побудови графіків у програмному забезпеченні, що розраховує теплові процеси у зварюванні, важливо використовувати ефективну та зручну бібліотеку.

Нижче наведено аналіз декількох популярних бібліотек та аргументацію вибору.

1. Chart.js

Простий у використанні інструмент для створення графіків різних типів (лінійні, гістограми, кругові, радарні тощо).

Переваги:

- Легка інтеграція в проекти.
- Зрозумілий API для налаштувань графіків.
- Підтримка адаптивного дизайну (графіки добре виглядають на різних розмірах екранів).
- Плагіни для розширення функціональності (наприклад, додавання анімацій або інтерактивності).

Недоліки:

- Можливості кастомізації обмежені у порівнянні з більш складними бібліотеками.
- Не підходить для надто складних або динамічних графіків.

2. D3.js (Data-Driven Documents)

Потужна бібліотека для роботи з даними та створення візуалізацій на основі SVG, HTML та CSS.

Переваги:

- Максимальна гнучкість: можна створювати будь-який тип графіків і візуалізацій.
- Підтримка анімацій і інтерактивності.
- Велика кількість готових прикладів і документації.

Недоліки:

- Крута крива навчання — вимагає більше знань та досвіду роботи з DOM і SVG.
- Для простих задач (наприклад, лінійних графіків) може бути "перевантаженим" інструментом.

3. Plotly.js

Бібліотека для створення інтерактивних графіків, орієнтована на простоту використання та багатofункціональність.

Переваги:

- Підтримка 3D-візуалізацій і великих наборів даних.
- Інтерактивність "з коробки" (масштабування, переміщення, підказки тощо).
- Легка інтеграція з іншими мовами програмування (Python, R).

Недоліки:

- Розмір бібліотеки — займає більше пам'яті в порівнянні з Chart.js.
- Менш кастомізований дизайн, ніж у D3.js.

4. Highcharts

Комерційна бібліотека з багатим функціоналом для створення різноманітних графіків.

Переваги:

- Легка інтеграція та налаштування.
- Підтримка інтерактивних графіків і анімацій.

- Готові теми та шаблони.

Недоліки:

- Комерційна ліцензія (безкоштовно лише для некомерційного використання).
- Менша гнучкість у порівнянні з D3.js.

Для реалізації програмного забезпечення було обрано бібліотеку Chart.js, оскільки:

1. Вимоги до графіків у проєкті передбачають побудову лінійних графіків температурного розподілу та інших залежностей, що легко реалізуються за допомогою Chart.js.

2. Простота використання дозволяє швидко інтегрувати графіки у проєкт без зайвих складнощів.

3. Адаптивність забезпечує коректне відображення графіків на різних пристроях.

Бібліотека не потребує великих ресурсів, що підходить для роботи з web-додатком.

2.3. Опис бібліотеки створення графіків Chart.js

Chart.js — популярна бібліотека JavaScript для створення графіків та діаграм на веб-сторінках, яка підтримує різні типи графіків, включаючи лінійні, стовпчасті, кругові, точкові та інші. Вона ідеально підходить для візуалізації даних, пропонуючи гнучкість та простоту використання [10].

Ось основні можливості та аспекти роботи з цією бібліотекою:

Основні типи графіків:

- Лінійні графіки (Line Charts) - відмінно підходять відображення змін значень з часом.
- Стовпчасті діаграми (Bar Charts) - допомагають візуалізувати порівняння категорій чи груп даних.
- Кругові діаграми (Pie та Doughnut Charts) - зручні для представлення

часток у загальній сумі.

- Полярні та радіальні графіки (Polar Area та Radar Charts) - корисні для представлення багатокутних наборів даних, часто для порівняльного аналізу.

Основні компоненти графіків у Chart.js:

- Datasets - набори даних, представлені масивами значень, включають параметри для відображення (колір, стиль ліній, ширина кордонів тощо).
- Axes - осьові дані дозволяють визначати масштабування, відображення міток, інтервали між ними та розташування (наприклад, горизонтальна або вертикальна вісь).
- Legend - легенда, що відображає назви та кольори, допомагає користувачам орієнтуватися серед графіків з кількома наборами даних.
- Tooltips - підказки, які з'являються при наведенні курсору на графік для відображення конкретних значень точок даних.

Для створення графіка потрібен елемент `<canvas>` у HTML. Бібліотека автоматично малює графік у зазначеному елементі, як тільки передано об'єкт конфігурації: `<canvas id="chart" width="400" height="200"></canvas>`.

Ініціалізація та створення графіка включає наступні пункти:

- Основна функція `plotChart` створює лінійний графік, що представляє температурні залежності вздовж зварного шва від відстані. Ця функція ініціалізує та налаштовує графік з урахуванням унікальних вимог до візуалізації, таких як динамічна зміна даних та стилізація.

- Створення контексту малювання.

Приклад JavaScript коду:

```
const ctx = document.getElementById('chart').getContext('2d');
```

Контекст малювання (2d) створюється за допомогою HTML-елемента `<canvas>`, що дозволяє Chart.js керувати малюванням графіків.

- Очищення існуючого графіка

Приклад JavaScript коду:

```
if (chart) { chart.destroy(); }
```

Перед створенням нового графіка перевіряється наявність старого графіка.

Якщо вона вже існує, вона видаляється за допомогою методу `destroy()`, щоб уникнути накладання нових даних на старі.

- Налаштування даних: `labels` і `datasets`

`labels` - відповідає значення осі X (у разі відстань по зварному шву), а `datasets` - за температурні значення вздовж осі Y. Об'єкт `datasets` визначає різні лінії даних щодо різних значень параметра Y.

- Налаштування стилю та макета.
- Налаштування заголовка та легенди

Приклад JavaScript коду:

```
plugins: { legend: { display: true, position: 'top' }, title: { display: true, text: 'Температура вздовж зварного шва (°C) в залежності від відстані (м)', font: { size: 19, color: '#000000' } } }
```

Включення легенди (`legend`) дозволяє відображати назви кожної лінії даних візуально розрізнити їх на графіку. Заголовок: «Температура вздовж зварного шва (°C) в залежності від відстані (м)» пояснює назву графіку.

Налаштування осей включає наступні пункти:

- Конфігурація осі X

Вісь X (`scales.x`) представляє відстань та має відповідний підпис.

Пиклад JavaScript коду:

```
x: { title: { display: true, text: 'Вісь X - відстань (м)', font: { size: 17 } } }
```

Підпис «Вісь X - відстань (м)» відображається з розміром шрифту 17, що робить її зрозумілою для користувача.

- Конфігурація осі Y

Вісь Y відповідає за температуру, яка завжди починається з нуля (`beginAtZero: true`).

Приклад JavaScript коду:

```
y: { title: { display: true, text: 'Вісь Y - температура (°C)', font: { size: 17 } }, beginAtZero: true }
```

Функція getRandomColor створює випадковий колір кожної лінії даних. Вона генерує шістнадцятковий код кольору, що складається із випадкових значень для кожної компоненти кольору (від 0 до F).

Приклад JavaScript коду:

```
function getRandomColor() { const letters = '0123456789ABCDEF'; let color = '#'; for (let i = 0; i < 6; i++) { color += letters[Math.floor(Math.random() * 16)]; } return color; }
```

Використання випадкових кольорів дозволяє автоматично стилізувати графік, полегшуючи користувачеві візуальну різницю між різними лініями.

Перелічені вище конфігурація та методи дозволяють гнучко візуалізувати дані, використовуючи бібліотеку Chart.js, та створюють наочне уявлення температурних змін уздовж зварного шва, допомагаючи аналізувати результати розрахунків.

2.4. Вибір фреймворку для створення веб-інтерфейсу програмного забезпечення

У розробленому ПЗ було прийнято рішення використовувати фреймворк Bootstrap.

Bootstrap є одним із найпопулярніших фреймворків для створення веб-інтерфейсів. Його вибір для розробки програмного інтерфейсу зумовлений численними перевагами, які забезпечують швидкість, адаптивність і зручність розробки [2].

Переваги використання Bootstrap

1. Адаптивний дизайн (Responsive Design)

Bootstrap автоматично адаптує веб-інтерфейс до різних розмірів екрану (комп'ютери, планшети, смартфони).

Грид-система (Grid System) дозволяє легко створювати макети, які добре виглядають на будь-якому пристрої.

2. Швидкість розробки

Готові компоненти (кнопки, форми, випадаючі меню, навігаційні панелі тощо) значно скорочують час створення інтерфейсу.

Використання класів дозволяє швидко додавати стилі без написання великої кількості CSS-коду.

3. Єдиний стиль

Bootstrap забезпечує уніфікований вигляд усіх елементів інтерфейсу, що робить дизайн професійним і гармонійним.

Легко застосовувати теми для швидкої зміни зовнішнього вигляду додатка.

4. Кросбраузерна сумісність

Всі елементи Bootstrap коректно працюють у більшості сучасних браузерів (Google Chrome, Mozilla Firefox, Safari, Edge тощо). Це виключає проблеми з відображенням інтерфейсу на різних платформах.

5. Велика спільнота та документація

Bootstrap має величезну базу прикладів, навчальних матеріалів і документації, що спрощує розробку навіть для новачків.

Підтримка спільноти дозволяє швидко знайти рішення для будь-якої проблеми.

6. Гнучкість налаштування

Фреймворк легко налаштовується: ви можете використовувати тільки потрібні компоненти або змінити стилі під специфічні потреби проєкту.

Можливість додавати свої CSS-стилі, не порушуючи роботу основних класів Bootstrap.

7. Сумісність із JavaScript-бібліотеками

Bootstrap має вбудовану підтримку інтерактивних компонентів (модальні вікна, слайдери, випадаючі меню), які використовують JavaScript.

Легко інтегрується з популярними бібліотеками, такими як jQuery або React.

8. Модульність

Bootstrap дозволяє вибрати лише потрібні модулі (наприклад, лише грід-систему або компоненти кнопок), що зменшує обсяг коду і підвищує продуктивність.

Висновки

					КР.131.6121м.04.03.02.ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Вибір мови програмування JavaScript для створення програмного забезпечення для розрахунку теплових процесів у зварюванні обумовлений його універсальністю, зручністю для кінцевих користувачів та потужними можливостями для інтерактивної візуалізації.

Завдяки JavaScript розроблена програма є легко доступною, інтуїтивно зрозумілою і здатною задовольнити потреби як початкових, так і професійних користувачів.

Завдяки використанню бібліотеки Chart.js вдалося забезпечити ефективну та зрозумілу візуалізацію даних у вигляді графіків. Ця бібліотека була обрана через її простоту інтеграції, підтримку адаптивного дизайну та можливість швидко створювати лінійні графіки, які ідеально підходять для відображення температурного розподілу та інших залежностей у рамках даного проєкту.

Застосування Bootstrap для створення веб-інтерфейсу дозволило значно скоротити час розробки, забезпечити адаптивність інтерфейсу для різних пристроїв та створити професійний, гармонійний дизайн із мінімальними витратами на налаштування стилів.

Таким чином, поєднання JavaScript, Chart.js і Bootstrap забезпечить створення ефективного, зручного та візуально привабливого програмного забезпечення, яке відповідає всім вимогам користувачів та меті проєкту.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ВЕБ-ІНТЕРФЕЙСУ ДЛЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТА НАПЛАВЛЕНІ

3.1. Розробка програмного забезпечення для розрахунку температурного поля при наплавленні

3.1.1. Призначення програмного забезпечення для розрахунку температурного поля при наплавленні

Програмне забезпечення (ПЗ) призначене для розрахунку поширення тепла в процесі зварювання і його впливу на температурне поле навколо зони наплавлення.

Важливим є точний розрахунок умов, щоб запобігти перегріву або недостатньому нагріванню, що може вплинути на якість зварного шва і структурні зміни матеріалу [1].

Основні напрямки розрахунку:

- Максимальна температура в зоні зварювання
- Термічний цикл - зміна температури в залежності від часу або інших параметрів після закінчення зварювання.

3.1.2. Блок-схема розрахунку програмного забезпечення

Блок-схема розрахунку температурного поля при наплавленні на масивне тіло [5] представлена на рис. 3.1.

Розподіл і зміна температури при наплавленні на напівнескінченне (масивне) тіло обчислюються за допомогою формул, отриманих в результаті розв'язання диференційного рівняння теплопровідності з певними початковими і крайовими умовами:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Найбільше поширення для теплових процесів зварювання отримав спосіб рішення диференційного рівняння методом джерел [6].

Рішення рівняння теплопровідності для зварювального джерела, що безперервно рухається в напрямку осі x з постійною швидкістю v, стає простішим у системі координат, що рухається разом з джерелом тепла.

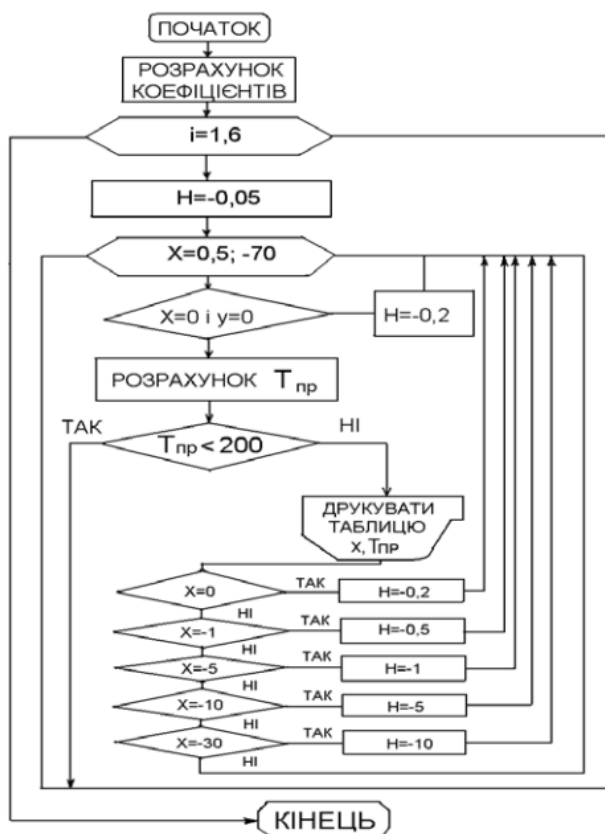


Рис. 3.1. Блок-схема розрахунку ПЗ

Програма розрахунку температурного поля при наплавленні на масивне тіло наведені у додатку 1.

Розрахунок температурного поля при зварюванні здійснюється шляхом фіксації координат у напрямках y і z , для яких визначаються граничні температури та коефіцієнти теплонасичення при різних значеннях x . У такій системі координат температурне поле може бути описано як функція від просторових координат (x , y , z) і часу [23].

Це вимагає вибору раціональних фіксованих значень y і z і перемінного кроку по x .

3.1.3. Розрахунок максимальних температур

Основна мета – розрахувати максимальну температуру вздовж лінії зварювання, залежно від відстані від лінії зварювання (Y) [2].

Використовувана формула:

$$T_{\text{макс.}} = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot L \cdot R} \cdot \exp\left(\frac{-V \cdot R}{A \cdot 10}\right) + T_{\text{поч.}} \cdot \left(1 - \frac{R}{10}\right);$$

де

- Q – ефективна теплова потужність,
- L – коефіцієнт теплопровідності,
- V – швидкість зварювання,
- A – температуропровідність,
- R – це відстань між точкою виміру і точкою на осі Y :
- $T_{\text{поч.}}$ – початкова температура.

R розраховується наступним чином:

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

де

- X - це відстань вздовж лінії шва, а Y - відстань від лінії зварювання.

Температура T зменшується зі збільшенням відстані R через розсіювання тепла.

Параметр $\exp\left(\frac{-V \cdot R}{A \cdot 10}\right)$ відповідає за експоненційне затухання температури вздовж лінії шва.

Параметр $T_{\text{поч.}}$ додається до значення температури для врахування початкових умов.

Для кожного значення Y розраховуються температури вздовж лінії шва (від $X=0$ до $X=0.5$ м), результати виводяться у вигляді таблиці та графіку.

3.1.4. Розрахунок термічного циклу

Термічний цикл визначає зміну температури з часом після завершення процесу зварювання [5].

Використовувана формула:

$$T = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot L \cdot R} \cdot \exp\left(\frac{-V \cdot R}{A}\right) \times \left(1 - \frac{R}{10}\right);$$

де

- Q – ефективна теплова потужність,
- V – швидкість зварювання,
- L – коефіцієнт теплопровідності,

- A – температуропровідність.

Температура (T) залежить від часу та відстані до точки розрахунку.

Експоненційний множник $\exp\left(\frac{-V \cdot R}{A}\right)$ відповідає за зменшення температури з часом і відстанню.

Додатковий множник $1 - \frac{R}{10}$ змінює температуру в залежності від відстані, враховуючи розсіювання тепла [1].

3.1.5. Розрахунок ефективної теплової потужності

Ефективна теплова потужність розраховується за формулою:

$$Q = I \cdot U \cdot \eta$$

де:

- I – сила струму (А).
- U – напруга (В).
- η – коефіцієнт корисної дії (ККД).

ККД перетворюється з відсотків у десятковий дріб.

Потужність Q вимірюється у ватах і враховує вплив струму, напруги і ефективності процесу.

Щоб забезпечити точність розрахунків температури, крок зміни відстані Y є динамічним.

Крок 0.05 використовується для зміни значень X від 0.5 до 0, що забезпечує плавний перехід і точні розрахунки температури у зоні зварювання [22].

3.1.6. Веб-інтерфейс програмного забезпечення

Веб-інтерфейс ПЗ містить поля для введення різних параметрів, таких як:

- λ – коефіцієнт теплопровідності (L), який визначає здатність матеріалу проводити тепло. Вимірюється у Вт/(м·К).
- α – коефіцієнт температуропровідності (A), вимірюється у см²/с. Визначає швидкість поширення тепла всередині матеріалу.
- V – швидкість зварювання, вимірюється в см/с. Визначає, як швидко переміщується джерело тепла.

- c_y – об'ємна теплоємність (CG), характеризує здатність матеріалу накопичувати тепло. Вимірюється у Дж/(см³·К).
- I та U – струм і напруга зварювання, використовуються для розрахунку ефективної теплової потужності (Q).
- ККД – коефіцієнт корисної дії зварювальної системи, виражений у відсотках.
- Y – відстань від лінії зварного шва, для якої здійснюються розрахунки температурного поля. Вимірюється у м.

Зовнішній вигляд веб-інтерфейсу програмного забезпечення представлений на рис. 3.2.

Введіть початкову температуру (°C):

Введіть швидкість зварювання (V), см/с:

Введіть струм зварювання (I), А:

Введіть напругу зварювання (U), В:

Введіть ККД процесу (%):

Введіть коефіцієнт теплопровідності (α), см²/с:

Введіть коефіцієнт теплопровідності (λ), Дж/(см·с·К):

Введіть значення Y в метрах (відстань від зварного шва в вертикальному напрямку, через кому):

Розрахувати

Рис.3.2. Веб-інтерфейс ПЗ для розрахунку температурного поля при наплавленні

Після натискання на кнопку "Розрахувати" на сторінці з'являється таблиця з розрахованими значеннями температури у різних точках уздовж зварного шва.

Ця таблиця (див. табл. 3.1.) відображає результати у форматі, який є зручним для аналізу та розуміння розподілу температури.

Таблиця. 3.1. Результати розрахунку

Опис стовпців у таблиці:

- **X** – відстань від зварювальної дуги у метрах.
- **T** – це температура у °C у відповідній точці Y.

При Y = 1.0 м.

x	T (°C)
0.50	17.76
0.45	17.81
0.40	17.85
0.35	17.88
0.30	17.91

При Y = 2.0 м.

x	T (°C)
0.50	15.88
0.45	15.90
0.40	15.92
0.35	15.94
0.30	15.96

При Y = 3.0 м.

x	T (°C)
0.50	13.92
0.45	13.93
0.40	13.95
0.35	13.96

Опис таблиці:

1. Заголовок для кожного значення Y .

Таблиця (див. табл. 3.1.) поділена на блоки для різних значень змінної Y , де Y - відстань від зварного шва у вертикальному напрямку. Наприклад, за $Y = 1.0$ м, $Y = 2.0$ м і т.д.

Кожен блок позначений заголовком, який вказує на поточне значення Y .

2. Стовпці таблиці:

- x - відстань від зварювальної дуги за метри.
- T - температура в градусах Цельсія у точці з відповідним значенням x .

3. Деталізація даних. У кожному рядку таблиці вказано значення x і відповідна температура T . Значення x йдуть з кроком, наприклад, 0.05 м, що дозволяє побачити поступову зміну температури вздовж зварного шва.

4. Опис стовпців. Над таблицею вказано опис стовпців:

- X - відстань від зварювальної дуги за метри.
- T - температура $^{\circ}\text{C}$ у відповідній точці Y .

Таблиця (див. табл. 3.1.) дозволяє користувачеві зручно аналізувати температурний розподіл для різних значень Y та відстежувати, як температура змінюється у міру віддалення від зварювального шва.

Далі будується графік розподілу температури вздовж лінії зварного шва (див. рис.3.3).

Також у веб-інтерфейсі є кнопки для додаткових дій:

- "Зберегти результати розрахунку" дозволяє зберегти отримані дані розрахунків у зручному форматі, щоб користувач міг їх використати пізніше.
- "Зберегти графік температури вздовж зварного шва залежно від відстані" зберігає графік, що відображає розподіл температури вздовж зварного шва.

Це дозволяє зберегти візуалізацію для подальшого аналізу.

3.1.7. Побудова графіку розподілу температури вздовж лінії зварного шва

Графік (див. рис.3.3.) ілюструє розподіл температури вздовж лінії зварного шва при різних значеннях відстані від осі зварювання ($Y = 1, 2, 3, 4$ метри).

Показані температури залежать від таких параметрів, як потужність зварювального джерела, теплопровідність матеріалу, швидкість зварювання та інші фактори.

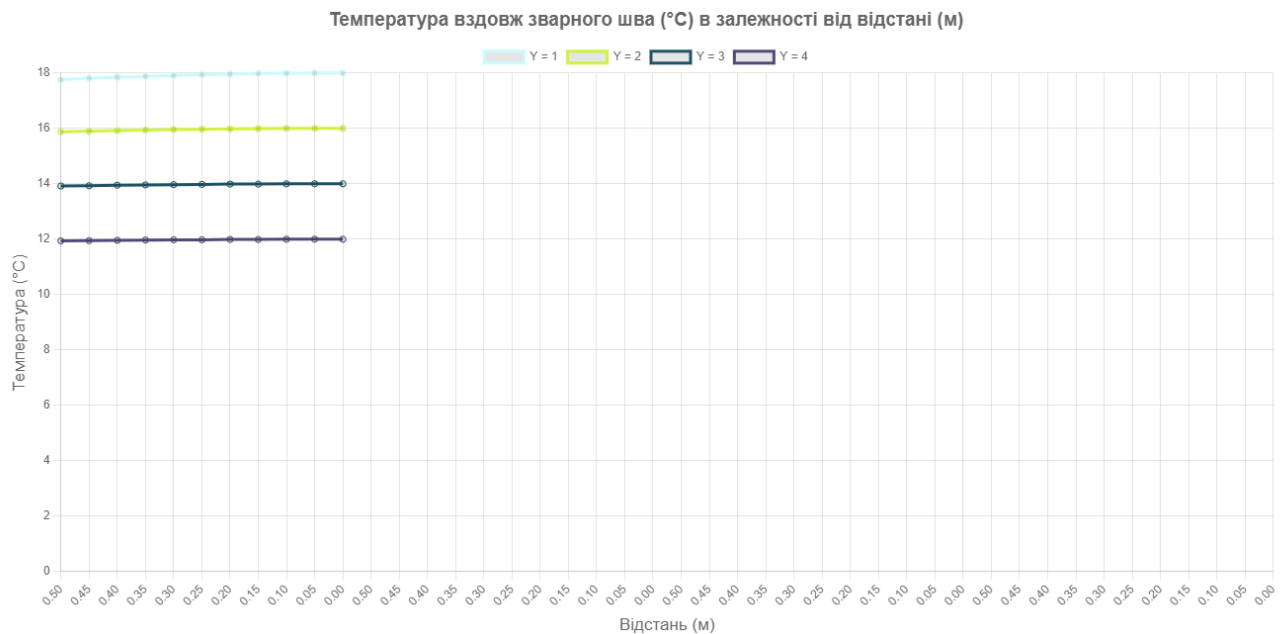


Рис.3.3. Графік розподілу температури вздовж лінії зварного шва

Основні спостереження з графіка:

- Стабільність температури по осі X. Усі температурні лінії показують майже постійні значення вздовж осі X (відстань вздовж шва). Температура незначно змінюється на малих відстанях (від 0 до 0,5 метра), що свідчить про незначний вплив розташування по шву на температурні коливання у вибраних умовах.

- Залежність температури від відстані Y. Температура залежить від відстані від осі зварювання (Y):

- Y = 1 м - найбільше значення температури близько 18 °C.
- Y = 2 м - температура знижується до 16 °C.
- Y = 3 м - температура знаходиться на рівні 14 °C.
- Y = 4 м - температура знижується до 12 °C.

За результатами графіка можна зробити такі висновки:

- Висока температура поблизу осі зварювання. Максимальні температури спостерігаються на відстані Y = 1 м, що відповідає області найближчої до джерела тепла.

- Зниження температури із збільшенням Y . Із збільшенням відстані від осі зварювання спостерігається закономірне зниження температури, що пояснюється швидким розсіюванням тепла у матеріалі.

- Температурна рівновага. На відстанях понад 4 м температура стабілізується і знаходиться в межах близьких до початкових значень навколишнього середовища.

3.2. Розробка програмного забезпечення для розрахунку температурного поля при наплавленні

3.2.1. Призначення програмного забезпечення для розрахунку термічних процесів при наплавленні на масивний виріб у зварюванні

Дане ПЗ розраховує, як тепло, що виділяється в процесі зварювання, поширюється виробом і впливає на температурний цикл. Це важливо для визначення правильних умов зварювання та запобігання перегріву або недостатньому нагріванню.

Наплавлення великих виробів потребує врахування значних обсягів матеріалу, що створює труднощі у передачі тепла по всій їхній структурі [12].

Зокрема, нерівномірне прогрівання може призводити до утворення тріщин, залишкових напружень або деформацій, що погіршує механічні властивості матеріалу.

Процес наплавлення полягає у нанесенні додаткового матеріалу на поверхню основного виробу для підвищення його зносостійкості, формування захисних шарів або відновлення пошкоджених частин.

Масивний виріб у цьому випадку - це об'єкт із великою масою і високою теплоємністю. Під час зварювання таких виробів необхідно враховувати особливості теплопередачі, оскільки вони здатні ефективно поглинати тепло, що впливає на температурні режими та термічний цикл зварювального процесу [21].

Дане ПЗ виконує розрахунки за двома основними напрямками:

- Максимальна температура в зоні зварювання.
- Термічний цикл — зміна температури в залежності від часу або інших параметрів після закінчення зварювання.

3.2.2. Блок-схема розрахунку програмного забезпечення

Блок-схема розрахунку термічного циклу для точки у зоні термічного впливу при наплавленні на масивне тіло представлена на рис.3.4 [5].

Програма розрахунку температурних полів і термічних циклів наведені в додатку 2.

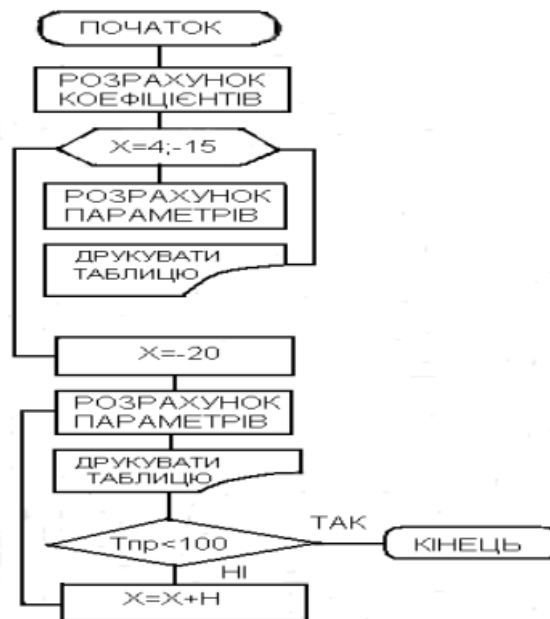


Рис.3.4. Блок-схема розрахунку термічного циклу для точки в ЗТВ при наплавленні на масивне тіло

За допомогою рівняння $T(x, y, z, t) = T_{\text{пр}}(R, x) \omega_3(\rho_3 \tau_3)$ можна визначити термічний цикл у будь-якій точці зварюваного тіла. У цьому контексті слід враховувати, що точка спостереження залишається нерухомою у просторі, тоді як система координат переміщується разом із джерелом тепла вздовж осі x .

Для визначення термічного циклу точки, яку нагрівають до 1350 °С і яка розташована на відстані 5 см від початку руху джерела, необхідно скористатися графіком, який показаний на рис. 3.5. За допомогою цього графіку знайдемо значення y_0 .

Координата x по мірі руху джерела змінюється від 5 см в момент початку зварювання ($t = 0$) до -15 см при її закінченні ($t = t_K$). Цей проміжок часу отримав назву період теплонасичення. Він характеризується інтенсивним поглинанням тепла матеріалом у зоні дії зварювального джерела [3].

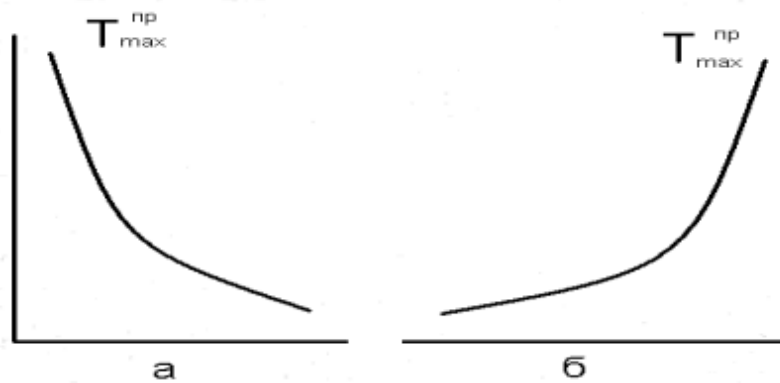


Рис.3.5. Залежність максимальних граничних температур від координат:

а) – у; б) – х

Після завершення процесу зварювання, у момент часу t_K , починається так званий період вирівнювання температур. У цей час температура у зварюваному тілі починає поступово вирівнюватися за рахунок теплопровідності, і теплові потоки спрямовуються до холодніших областей.

Цей підхід дозволяє моделювати процес теплового вирівнювання з використанням симетричного теплового балансу [17].

Введення фіктивних джерел і стоку теплоти значно спрощує розрахунок температурних змін у період вирівнювання. Цей підхід дозволяє застосовувати ті самі математичні закони, що і для періоду теплонасичення, але з додатковим урахуванням впливу стоку теплоти.

Температуру в періоді вирівнювання можна розглядати як алгебраїчну суму температур: $T(t)$ – від зварювального джерела, що ніби продовжує діяти і $T(t - t_K)$ – від стоку теплоти по потужності рівного зварювальному, що розпочав діяти у момент часу t_K ,

$$T_B(t) = T(t) - T(t - t_K) = T_{\text{пр}} [\Psi_3^{\text{ДЖ}}(\rho_3^{\text{ДЖ}}, \tau_3^{\text{ДЖ}}) - \Psi_3^{\text{СТ}}(\rho_3^{\text{СТ}}, \tau_3^{\text{СТ}})]$$

де $\Psi_3^{\text{ДЖ}}(\rho_3^{\text{ДЖ}}, \tau_3^{\text{ДЖ}})$ - коефіцієнт теплонасичування для даної точки від як би продовжуємого діяти зварювального джерела;

$\Psi_3^{\text{СТ}}(\rho_3^{\text{СТ}}, \tau_3^{\text{СТ}})$ – коефіцієнт теплонасичування для тієї ж точки від стоку теплоти, що почав діяти з часу t_K .

Безрозмірні критерії відстані і часу визначимо для даного випадку наступними виразами [1]:

$$\rho_3^{\text{ДЖ}} = \rho_3^{\text{СТ}} = \frac{vR}{2a},$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \tau_3^{\text{ДЖ}} = \frac{v^2 t}{4a}, \quad \tau_3^{\text{СТ}} = \frac{v^2 (t - t_k)}{4a}$$

Час t для даної задачі можна розрахувати по формулі $t = (5 - x) / v$.

3.2.3. Розрахунок максимальних температур

Основна мета – розрахувати максимальну температуру в залежності від відстані від лінії зварювання.

Використовувана формула:

$$T = \frac{K1}{Y^2}$$

де

- $K1$ – це коефіцієнт, який залежить від потужності зварювального джерела,

теплопровідності матеріалу та швидкості зварювання.

- Y – відстань від точки зварювання. Температура зменшується із збільшенням відстані.

Максимальні температури визначаються різних значень Y з кроком $\Delta Y = 0.1$.

Формули для розрахунку:

- S - ефективна площа теплового потоку:

$$S = \frac{0.368 \times Q \times 2}{\pi \cdot V}$$

де:

- Q – ефективна теплова потужність зварювання.
- V – швидкість зварювання.
- π - математична константа (π).
- $R0$ - коефіцієнт, пов'язаний з радіусом теплового впливу:

$$R0 = \sqrt{\frac{S}{CG \cdot TM}}$$

де: CG – питома теплоємність матеріалу, TM - максимальна температура

Таким чином, T зменшується зі збільшенням відстані Y , що відповідає фізичній реальності, де тепло розсіюється далі від точки зварювання.

Ефективна теплова потужність розраховується за формулою:

$$Q = I \cdot U \cdot \eta$$

де:

I – сила струму (А), U – напруга (В), η – коефіцієнт корисної дії (ККД).

ККД перетворюється з відсотків у десятковий дріб.

3.2.4. Розрахунок термічного циклу

Термічний цикл показує, як температура змінюється в залежності від часу або інших параметрів після зварювання [8].

Це важливо для оцінки деформацій, змін у структурі матеріалу та якості наплавленого шару.

Формула для розрахунку температури у термічному циклі:

$$T = \left(\frac{K2}{\ln(TB+1)} \right) \cdot 150,$$

де:

- $K2$ — коефіцієнт, що з тепловими характеристиками.
- TB - змінна, яка може представляти час після зварювання або іншу змінну, що впливає на зміну температури.
- $\text{Math.log}(TB + 1)$ - натуральний логарифм від $TB + 1$. Логарифм згладжує зміни температури під час зростання.
- 150 - це коефіцієнт, який масштабує результат.

$$K2 = \left(\frac{q}{2 \cdot P \cdot L \cdot V} \right)$$

де:

- L - коефіцієнт теплопровідності.

Таким чином температура змінюється в залежності від часу після зварювання.

					КР.131.6121м.04.03.03.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Малі значення температури (Т) можуть бути результатом того, що зі збільшенням відстані від зони зварювання тепло розсіюється і температура швидко падає.

Логарифм у цій формулі дозволяє повільніше змінювати температуру зі збільшенням значення ТВ, що може краще описувати реальні процеси охолодження у деяких випадках.

Для зміни часової змінної ТВ використовується динамічний крок К.

Крок змінюється в залежності від поточного значення ТВ для точного моделювання термічного процесу.

Зі збільшенням часу після зварювання крок збільшується, оскільки процес уповільнюється і зміни температури стають плавнішими [6].

3.2.5. Веб-інтерфейс програмного забезпечення

Веб-інтерфейс ПЗ містить поля для введення різних параметрів, таких як:

- λ - коефіцієнт теплопровідності

Це фізична величина, яка визначає здатність матеріалу проводити тепло. Вимірюється в Дж/(см·с·К)

Приклади значень представлені у таблиці 3.2

Таблиця 3.2. Приклади значень коефіцієнту теплопровідності [5]

Матеріал	Коефіцієнт теплопровідності
Низьковуглецеві та низьколеговані сталі	0,38...0,42
Нержавіючі аустенітні сталі	0,25...0,33
Мідь	3,70...3,80
Латунь	1,17
Алюміній	2,70
Титан	0,17

- α – Коефіцієнт температуропровідності α , см²/с

Ця величина визначає швидкість поширення тепла всередині матеріалу.

Це залежить від теплопровідності, щільності та теплоємності матеріалу.
Вимірюється в $\text{см}^2/\text{с}$. Приклади значень представлені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Приклади значень коефіцієнту теплопровідності [5]

Матеріал	Коефіцієнт теплопровідності
Низьковуглецеві та низьколеговані сталі	0,075...0,09
Нержавіючі аустенітні сталі	0,053...0,07
Мідь	0,950...0,96
Латунь	0,34
Алюміній	1,00
Титан	0,06

- V - швидкість зварювання

Це швидкість переміщення зварювальної головки або джерела тепла.
Вимірюється в $\text{см}/\text{с}$ або $\text{мм}/\text{с}$.

- c_v - об'ємна теплоємність

Ця величина характеризує здатність матеріалу накопичувати тепло.
Вимірюється у $\text{Дж}/(\text{см}^3 \cdot \text{К})$. Приклади значень представлені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Приклади значень коефіцієнту об'ємної теплоємності [5]

Матеріал	Коефіцієнт теплоємності
Низьковуглецеві та низьколеговані сталі	4,90...5,2
Нержавіючі аустенітні сталі	4,70...4,8
Мідь	3,85...4,0
Латунь	3,45

Продовження таблиці 3.4

Алюміній	2,70
Титан	2,80

- ТМ - максимальна температура

Це максимальна температура, до якої може нагріватися матеріал у зоні зварювання. Вимірюється у °С.

- Поточний струм (I) та напруга (U)

Параметри зварювання в амперах і вольтах відповідно.

Використовуються для розрахунку потужності, що подається у зварювальну зону.

- ККД - це коефіцієнт корисної дії, виражений у відсотках. Визначає, скільки підведеної електричної енергії фактично перетворюється на тепло.

Зовнішній вигляд веб-інтерфейсу ПЗ представлений на рис.3.6.

Після натискання на кнопку "Розрахувати" на екрані з'являються дві таблиці з розрахунковими даними.

Перша таблиця (див. табл. 3.5) – "Розрахунок максимальних температур" – відображає розподіл температури залежно від відстані від лінії зварювання.

Ця таблиця має два стовпці:

- Y (см.) - Відстань від зварного шва (або від зони з найбільшою температурою), виражене в сантиметрах.
- T (°C) — температура у °C у точці на заданій відстані Y.

Таблиця 3.5 - Розрахунок максимальних температур

Y (см.)	T (°C)
0.10	899.6
0.11	743.5
0.12	624.8
0.13	532.3
0.14	459.0

Введіть коефіцієнт теплопровідності (λ), Вт/(м·К):

50

Введіть коефіцієнт температуропровідності (α), см²/с:

0.075

Введіть струм зварювання (I), А:

100

Введіть напругу зварювання (U), В:

24

Введіть ККД процесу (%):

80

Введіть швидкість зварювання (V), см/с:

10

Введіть об'ємну теплоємність (с_v), Дж/(см³·К):

4.9

Введіть максимальну температуру (T_M), °С:

1500

Розрахувати

Рис.3.6. Веб-інтерфейс ПЗ для розрахунку термічних процесів при наплавленні на масивний виріб у зварюванні

Приклад даних у таблиці:

- На відстані 0.10 см температура становить 899.6 °С.
- На відстані 0.15 см - 399.8 °С.
- На відстані 0.30 см - 100.0 °С і так далі.

Друга таблиця – "Розрахунок термічного циклу" – показує процес охолодження зварного шва, характеризуючи зміну температури з часом (див. табл. 3.6).

Таблиця 3.6. Розрахунок термічного циклу

ТВ (с.)	Т (°C)
0.9	142.8
1.0	132.3
1.2	116.3
1.4	104.7
1.6	95.9
1.8	89.0
2.0	83.4

Ця таблиця (див. табл.3.6.) також містить два стовпці:

- ТВ (с.) - час охолодження в секундах, що відображає моменти охолодження.
- Т (°C) – температура у °C на кожному етапі охолодження (у момент часу ТВ).

Приклад даних у таблиці (див. табл.3.6):

- Через 0.9 с. температура становить 142.8 °C.
- Через 1.6 с. – 95.9 °C.
- Через 2.0 с. - 83.4 °C і так далі.

Ці дані допомагають візуалізувати та аналізувати поведінку температури у міру збільшення відстані від зварного шва та у міру проходження часу в процесі охолодження.

Також у веб-інтерфейсі є кнопки для додаткових дій:

- "Зберегти результати розрахунку" дозволяє зберегти отримані дані розрахунків у вигляді HTML-файлу. Це корисно для документування або подальшого аналізу числових значень розподілу температури.
- "Зберегти графік максимальної температури вздовж лінії зварного шва" дозволяє зберегти графік, який показує максимальні температури вздовж лінії зварного шва.

Це корисно для швидкого порівняння пікових значень температури по довжині шва.

- "Зберегти графік розподілу температури вздовж лінії зварювання" дозволяє зберегти графік, що відображає повний розподіл температури по всій лінії зварного шва. Ця кнопка корисна для візуалізації температурного профілю, що може бути використано для глибшого аналізу процесу зварювання.

Ці кнопки (див. рис. 3.7) полегшують користувачеві збереження важливих даних і графічних результатів для подальшого використання.

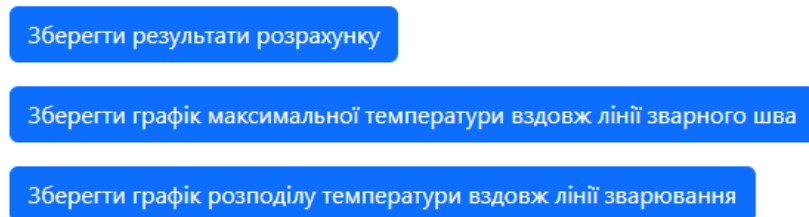


Рис.3.7. Кнопки збереження даних

Далі будується два графіка: графік розподілу максимальної температури вздовж лінії зварного шва (див. рис.3.8), та графік розподілу температури вздовж лінії зварювання (див. рис.3.9).

3.2.6. Побудова графіку розподілу розподілу максимальної температури вздовж лінії зварного шва

Графік на рис. 3.8 демонструє розподіл максимальної температури вздовж лінії зварного шва.

Розраховані значення температури вздовж осі Y (відстань) залежать від багатьох факторів, таких як потужність зварювального джерела, теплопровідність матеріалу, швидкість зварювання та інші параметри.

Максимальна температура T на графіку зменшується за експоненційною залежністю зі збільшенням відстані від лінії зварювання Y . Таке зниження температури пояснюється тим, що тепла енергія від зварювання швидко розсіюється зі збільшенням відстані від зони теплового впливу.

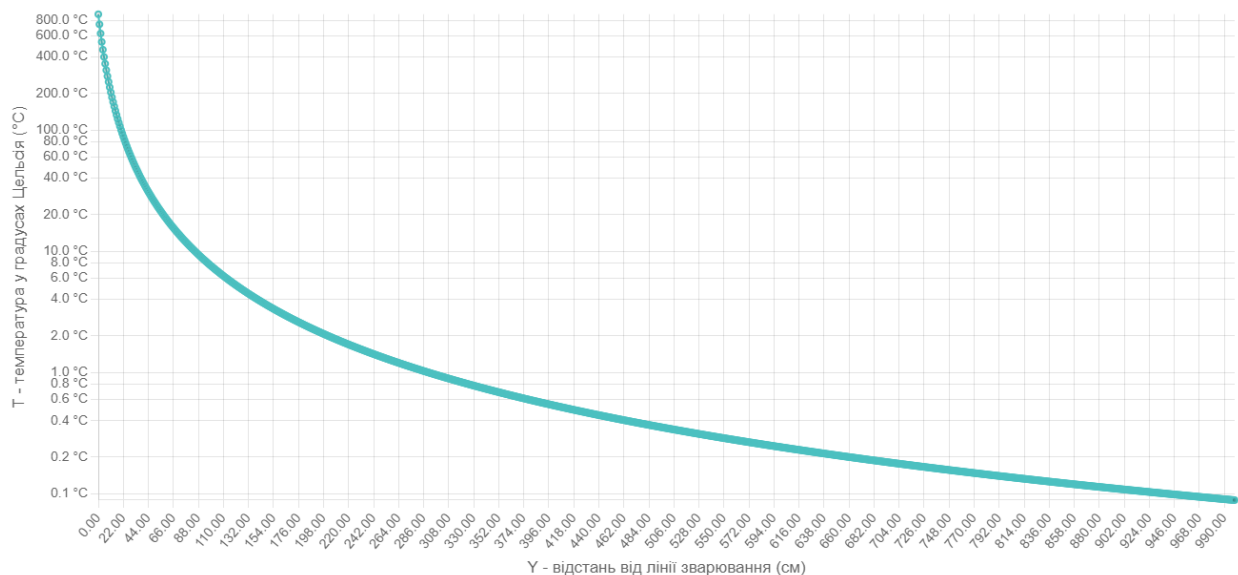


Рис. 3.8. Графік розподілу максимальної температури вздовж лінії зварного шва

Основні спостереження з графіка:

- Висока температура на початковій відстані.

У зоні безпосереднього впливу зварювального тепла температура досягає значень до 800 °C. Це відповідає зоні прямого впливу зварювального джерела, де відбувається сильне нагрівання та плавлення матеріалу.

- Різке зниження температури.

В діапазоні від 0 до 100 см температура швидко зменшується до значень нижче 20 °C. Це свідчить про різке охолодження матеріалу в міру віддалення зони зварювання, що характерно для процесу теплопередачі в металі.

- Зона охолодження.

У міру віддалення від зварювального шва тепло розсіюється в матеріалі і температура поступово знижується до кімнатних значень. На відстанях більше 200 см температура наближається до 1-2°C, що говорить про завершення процесу охолодження та мінімальний вплив тепла на цих ділянках.

3.2.7. Побудова графіку розподілу температури вздовж лінії зварювання

На рис. 3.9 представлений графік розподілу температури вздовж лінії зварювання. Він показує, як температура змінюється в залежності від відстані Y від точки зварювання.

					КР.131.6121м.04.03.03.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

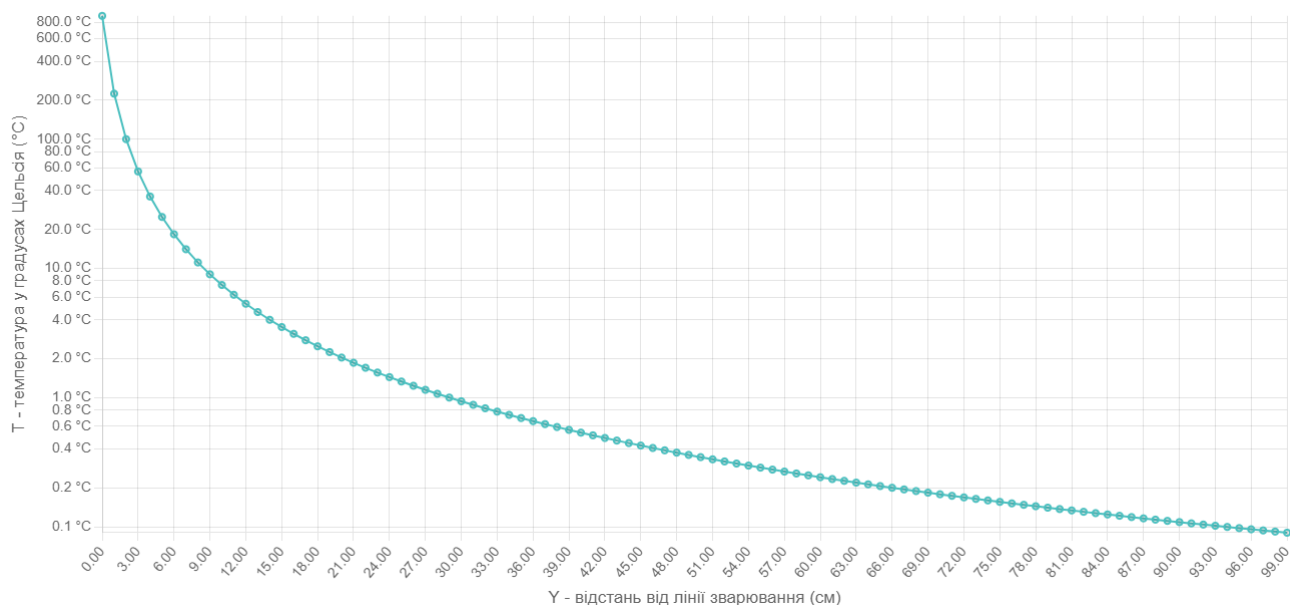


Рис.3.9. Графік розподілу температури вздовж лінії зварювання

Цей графік служить для аналізу температурного поля, що необхідно для оцінки якості зварного шва, можливих термічних напруг та деформацій.

Основні спостереження з графіка:

- Початкова висока температура - температура на початкових ділянках досягає 800°C, що вказує на область, де відбувається пряма дія зварювального джерела. Це центральна зона зварювання, де є максимальна теплова енергія.
- Різде зниження температури - температура починає швидко знижуватись вже на відстані близько 5-10 см від шва, падаючи до 50-100 °C. Це свідчить про сильну теплопередачу від зварювальної зони до навколишнього матеріалу.
- Низькі температури на віддалених ділянках - після 50 см від точки зварювання температура знижується до значень близьких до нуля, що означає, що матеріал на цих ділянках практично не піддається термічній дії від зварювання.
- Плавне зниження - графік на великих відстанях від зварювальної зони показує поступове зниження температури, що вказує на успішне розсіювання теплової енергії та мінімальну залишкову теплову напругу.

Обидва графіки демонструють типові процеси теплопередачі в зварних з'єднаннях. Швидке зниження температури на малих відстанях від зварювальної зони говорить про хорошу теплопередачу в матеріалі, що важливо для мінімізації термічних деформацій та забезпечення високої міцності зварного з'єднання.

					КР.131.6121м.04.03.03.ПЗ		Аркуш
							60
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

3.3. Розробка програмного забезпечення для розрахунку температурного поля при зварюванні

3.3.1. Призначення програмного забезпечення для розрахунку температурного поля при зварюванні.

Програмне забезпечення розроблено для моделювання температурного поля під час зварювання пластин. Метою програми є аналіз розповсюдження тепла в матеріалі та вплив на температурне поле у зоні термічного впливу.

Основні напрямки розрахунку:

- Розрахунок термічного циклу в зоні ЗТВ:
- Аналіз зміни температури в різних точках металевої пластини протягом усього процесу зварювання.
- Визначення максимальних і мінімальних температур у точках зварного шва та зони термічного впливу.
- Моделювання нагрівання та охолодження матеріалу для прогнозування структурних змін у металі.

3.3.2. Блок-схема розрахунку

Блок-схема розрахунку температурного поля при наплавленні на масивне тіло [5] представлена на рис.3.10.

При однопрохідному зварюванні пластин теплове джерело нагріву розглядається як лінійне і рівномірно розподілене вздовж осі oz на відрізьку, що відповідає товщині пластини δ .

Для опису температурного розподілу в пластині під час зварювання припускається, що пластина є безмежною, а її граничні поверхні $z = 0$ і $z = \delta$ обмінюються теплом з навколишнім середовищем з нульовою температурою при коефіцієнті тепловіддачі α .

За цих умов функціональна залежність температури в різних точках пластини від часу визначається шляхом розв'язання відповідного диференційного рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - bT$$

					КР.131.6121м.04.03.03.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

де b – коефіцієнт температуровіддачі, $b = 2\alpha/c\gamma\delta$ (α – коефіцієнт теплообміну поверхонь пластини з навколишнім середовищем).

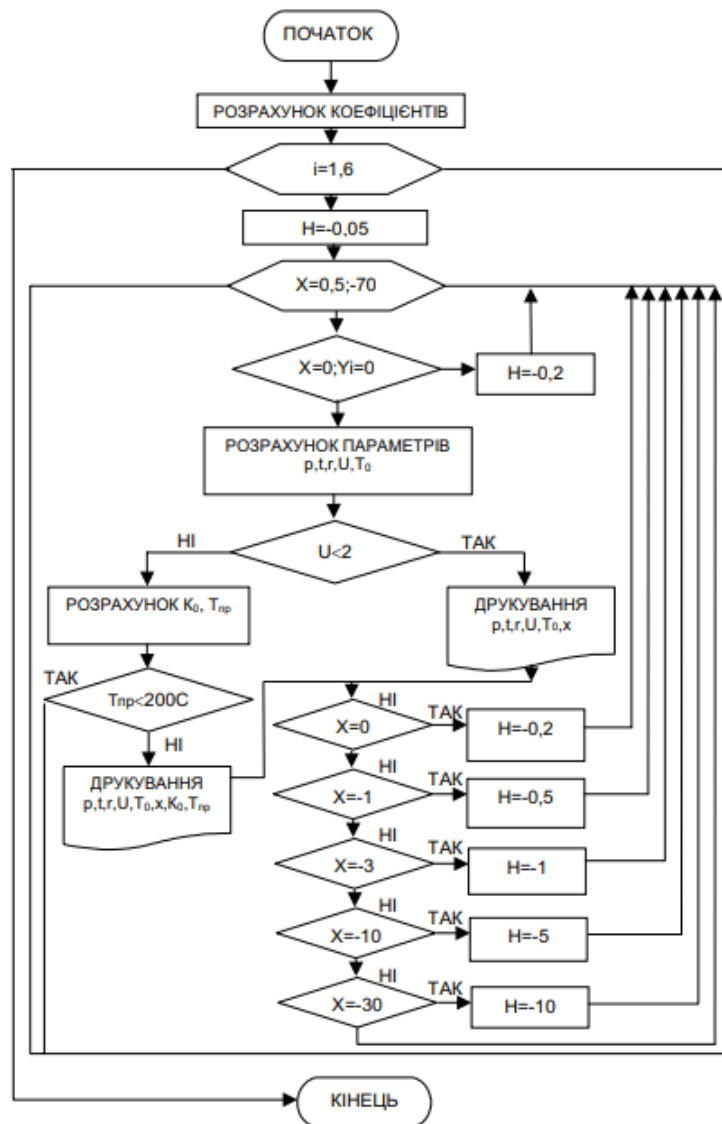


Рис.3.10. Блок-схема розрахунку температурного поля при зварюванні

Для плоского процесу розповсюдження теплоти від лінійного джерела, що рухається в пластині товщиною δ (однопрохідне зварювання пластин), зміна температури в пластині описується рівнянням теплопередачі, яке враховує вплив зварювального джерела та теплообміну з навколишнім середовищем.

$$T(x, y, t) = \frac{q}{4\pi\lambda\delta} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_{t_2}^{dt^2} \exp\left[-\frac{r}{4at_2} - \left(\frac{v^2}{4a} + b\right)t_2\right];$$

$$T_{\text{гр}}(r, x) = \frac{q}{4\pi\lambda\delta} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) K_0\left(r\sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}\right)$$

Значення частинних похідних граничної температури по x при однопрохідному зварюванні обчислюються по формулі:

$$T_{\text{пр}}(x, r) = K \exp(K_2 x - K_3 r) \frac{1}{\sqrt{r}} \left[\left(1 - \frac{K_5}{r}\right) \left(K_2 - K_3 \frac{x}{r}\right) - \frac{x}{2r^2} \left(1 - \frac{3K_5}{r}\right) \right]$$

де

$$K = K_1 K_4; K_1 = \frac{q}{4\pi\lambda\delta}; K_2 = -\frac{v}{2a}; K_3 = \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}; K_4 = \sqrt{\frac{\pi}{4K_3}}$$

$$K_5 = \frac{1}{8K_3} \lambda$$

3.3.3. Розрахунок ефективної теплової потужності

Використовуючи дані про струмі напругу, ПЗ розраховує ефективну теплову потужність (Q) за формулою:

$$Q = I \cdot U \cdot \eta;$$

де

- Q – ефективна теплова потужність у (Вт).
- I - Струм в (А).
- U - напруга у (В).
- η - коефіцієнт корисної дії (ККД), виражений в частках (наприклад, 0.8 для 80%)

Цей розрахунок є критично важливим для оцінки теплового впливу на матеріал під час зварювання.

Визначення ефективної теплової потужності дозволяє передбачити, скільки енергії буде використано для плавлення металу, що вплине на якість зварювального з'єднання [2].

3.3.4. Розрахунок коефіцієнтів $K_1 \dots K_5$.

Розрахунок коефіцієнту K_1 :

$$K_1 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot D}$$

K_1 враховує теплову потужність, теплопровідність та товщину матеріалу.

Чим більша товщина або теплопровідність, тим менше значення K1.

Розрахунок коефіцієнту K2:

$$K2 = -\frac{V}{2 \cdot A}$$

K2 показує, як швидкість зварювання впливає розподіл температури [7].

Велика швидкість зварювання зменшує час нагрівання матеріалу.

Розрахунок коефіцієнту K3:

$$K3 = \sqrt{K2^2 + \frac{B}{A}}$$

K3 комбінує вплив коефіцієнта перенесення тепла та температуропровідності.

Чим вище K3, тим більше вплив конвекції на розподіл температури.

Розрахунок коефіцієнту K4:

$$K4 = \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot K3}}$$

Цей коефіцієнт обчислюється на основі значення K3, який включає вплив коефіцієнта перенесення тепла B і температуропровідності A.

Розрахунок коефіцієнту K5:

$$K5 = \frac{1}{8 \cdot K3}$$

K5 показує, як швидкість тепловіддачі (визначена коефіцієнтом B) проти товщиною матеріалу впливає тепловий розподіл. Вищі значення K5 можуть вказувати на те, що тепло швидше йтиме від зони зварювання, що може призвести до більш швидкого охолодження і меншої зміни температури в матеріалі.

K5 є важливим параметром для визначення швидкості нагрівання та охолодження в процесі зварювання. Цей коефіцієнт допомагає прогнозувати, як швидко відбудуватиметься відведення тепла, що критично важливо для контролю якості зварного шва та запобігання термічних ушкоджень [13].

3.3.5. Розрахунок температури у точці (X,Y)

Формула для розрахунку:

$$T = \frac{K \cdot \exp(K2 \cdot X - K3 \cdot R) \cdot (1 - \frac{K5}{R})}{\sqrt{R}}$$

де R - радіус або відстань від точки, в якій відбувається тепловий процес, наприклад, від джерела тепла (в даному випадку, зварювальної дуги) до точки, де вимірюється температура

K - коефіцієнт, що задає загальну величину температури T.

Температура T розраховується на основі координат X та Y, а також коефіцієнтів K, K2, K3, K5.

Температура T визначає температуру в конкретній точці зварного шва, заданої координатами (X,Y).

Залежить від відстані X, від джерела тепла та інших чинників, визначених коефіцієнтами.

3.3.6. Розрахунок симетричної температури T1

Формула для розрахунку:

$$T1 = \frac{K \cdot \exp(K2 \cdot S - K3 \cdot R1) \cdot (1 - \frac{K5}{R1})}{\sqrt{R1}}$$

де

- S - Позиція вздовж зварного шва або будь-якої іншої заданої системи координат.

- R1 - Радіус або відстань від точки, де відбувається зварювання.

Це значення дає змогу враховувати ефекти відстані на температуру.

Визначає температуру у певній точці зварного шва, заданої координатами S та R1.

Це значення може використовуватися для аналізу розподілу температури у симетричних точках щодо джерела тепла.

3.3.7. Розрахунок градієнта температури

Градiєнт температури – це міра зміни температури у просторі. Він показує, як температура змінюється в залежності від зміни координат (наприклад, по осях X і Y) [3].

					КР.131.6121м.04.03.03.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

$$PT = T \cdot F$$

$$PT1 = T1 \cdot F1$$

У контексті наведених рівнянь:

PT - це похідна температури T по осі X , тобто показує, як температура змінюється вздовж цієї осі.

Чим більше значення PT , тим швидше температура змінюється у напрямку X .

$PT1$ - це похідна температури $T1$ по осі Y , що аналогічно описує, як температура змінюється вздовж осі Y .

Формули $PT = T \cdot F$ і $PT1 = T1 \cdot F1$ пов'язують градієнти температури з температурами у відповідних точках та деякими коефіцієнтами F і $F1$.

Таким чином, градієнти температури допомагають зрозуміти, як температура розподіляється у просторі, і є важливою частиною аналізу теплових процесів, таких як зварювання, де необхідно враховувати зміну температури в різних точках зони термічного впливу.

3.3.8. Веб-інтерфейс програмного забезпечення

Веб-інтерфейс ПЗ містить поля для введення різних параметрів, таких як:

- Струм зварювання (I), який впливає на кількість тепла, що генерується під час зварювання.
- Напруга зварювання (U), що визначає електричний потенціал, необхідний для підтримання зварювального процесу.
- Коефіцієнт корисної дії (ККД) у відсотках, який показує, яка частина електричної енергії перетворюється на теплову.
- Швидкість зварювання (V) в см/с, яка визначає, як швидко переміщується зварювальна дуга по поверхні матеріалу.
- Коефіцієнт температуропровідності (α) в см²/с, що характеризує швидкість поширення тепла всередині матеріалу.
- Коефіцієнт теплопровідності (λ) в Дж/(см·с·К), який визначає здатність матеріалу проводити тепло.

- Коефіцієнт температуровіддачі (B) в $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, що впливає на теплову втрату матеріалу в навколишнє середовище.

Товщина листа (D) в см, що визначає геометричні характеристики зварювального з'єднання.

Зовнішній вигляд веб-інтерфейсу ПЗ представлений на рис. 3.11.

Введіть швидкість зварювання (V), см/с:

1

Введіть струм зварювання (I), А:

100

Введіть напругу зварювання (U), В:

24

Введіть ККД процесу (%):

80

Введіть товщину листа D, см :

1

Введіть коефіцієнт теплопровідності (α), $\text{см}^2/\text{с}$:

0.08

Введіть коефіцієнт теплопровідності (λ), $\text{Дж}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$:

0.4

Введіть коефіцієнт температуровіддачі (B), $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$:

10

Розрахувати

Рис.3.11. Веб-інтерфейс ПЗ розрахунку температурного поля при зварюванні

Після натискання на кнопку "Розрахувати" таблиця результатів (див. табл. 3.7). надає дані про температуру в певних точках навколо зварного шва.

Ці результати показують розподіл температури горизонтальними і вертикальними координатами (X і Y) і дають уявлення про те, як тепло поширюється

в матеріалі, як воно зменшується в міру віддалення від шва, і де відбуваються різкі зміни температурного градієнта. Ці дані можуть бути корисними для оцінки міцності, деформації та стійкості матеріалу після зварювання [7].

Таблиця поділена на кілька блоків. Кожен блок відповідає певній координаті по осі Y (наприклад $Y = 0.1$ м, $Y = 0.35$ м і т. д.). Таким чином, блоки показують, як розподіляється температура в залежності від координати Y - на різних відстанях від шва у вертикальному напрямку.

Таблиця 3.7. Розрахунок температурного поля при зварюванні

Y	X	T	T1	PT	PT1
0.10	0.00	212.08	57.93	-1325.52	-1010.18
0.10	0.10	57.93	8.84	-1010.18	-172.62
0.35	0.00	4.97	2.18	-31.04	-22.09
0.60	0.00	0.16	0.07	-0.98	-0.63
0.85	0.00	0.01	0.00	-0.03	-0.02
1.10	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00
1.35	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00

Кожен блок містить рядки, які відповідають різним координатам X, тобто різним горизонтальним позиціям вздовж або впоперек шва. Стовпці таблиці надають інформацію про температуру, її симетричні значення і градієнти.

Стовпці таблиці та їх значення:

- Стовпець Y:

Цей стовпець показує координату осі Y, яка відображає вертикальну відстань від зварного шва в напрямку товщини матеріалу.

Значення Y фіксовані для кожного блоку, тому всі рядки в блоці мають те саме значення Y, але різні значення X.

- Стовпець X:

Цей стовпець вказує координату по осі X, яка визначає положення вздовж або впоперек шва.

Різні значення X у кожному блоці дозволяють аналізувати розподіл температури по горизонталі одному рівні Y .

Координати X змінюються, показуючи, як температура змінюється під час руху вздовж осі X на фіксованій висоті Y .

- Стовпець T ($^{\circ}\text{C}$):

Цей стовпець показує розраховане значення температури у точці (X, Y) .

Температура в різних точках вздовж осі X показує, як тепло поширюється горизонтально на заданому рівні Y .

Ці дані дозволяють зрозуміти, як тепло уникає шва і як воно впливає на матеріал у міру віддалення від зварювальної зони.

- Стовпець $T1$ ($^{\circ}\text{C}$):

Це симетричне значення температури T , що відображає точку, протилежну даної осі X або Y .

Симетрична температура корисна для перевірки того, наскільки рівномірно розподіляється температура щодо центральної лінії шва, а також для аналізу температурних профілів на протилежних сторонах шва.

- Стовпець PT :

Цей стовпець відображає похідну температури осі X , тобто градієнт температури в цьому напрямку.

Градієнт температури показує, наскільки сильно змінюється температура вздовж осі X , що важливо для розуміння теплової напруги та деформацій, які можуть виникнути в матеріалі при охолодженні.

Високі значення градієнта вказують на різку зміну температури, що може створити високу теплову напругу.

- Стовпець $PT1$:

Це похідна температури осі Y , що показує зміна температури вздовж осі Y .

Градієнт температури осі Y корисний для аналізу температурного розподілу по товщині матеріалу, тобто як тепло поширюється і убиває у вертикальному напрямку від шва.

Ці дані також допомагають оцінити де можуть виникнути теплові деформації по вертикалі.

Результати та практичне застосування таблиці даних:

- Аналіз розподілу температури. Розподіл температури дозволяє оцінити, як матеріал буде остигати після зварювання і як тепло впливає на навколишній матеріал. Високі температури ближче до шва можуть спричинити зміну структури металу та вплинути на його властивості.
- Оцінка температурних градієнтів. Стовпці T та $T1$ допомагають зрозуміти, наскільки різко температура змінюється у кожному напрямі. Це важливо для прогнозування теплових напруг і деформацій, особливо в матеріалах, які можуть бути схильні до розтріскування або деформацій під впливом теплового циклу зварювання.
- Симетричний розподіл. Порівняння T і $T1$ дозволяє зрозуміти, чи симетрично поширюється тепло від шва. Це може вказувати на рівномірність нагріву та охолодження, що важливо для оцінки залишкових напруг та можливої появи тріщин.
- Практичне застосування. Знання точного температурного профілю та градієнтів дозволяє інженерно обґрунтовано вибирати матеріали, способи зварювання та додаткові технології для зменшення залишкової напруги. Також це можна використовувати для моделювання довговічності зварних конструкцій.

Також у веб-інтерфейсі є кнопки для додаткових дій, які представлені на рис. 3.12.

Зберегти результати розрахунку

Зберегти графік розподілу температури вздовж осі X

Зберегти графік розподілу температури у глибину матеріалу по осі Y

Рис.3.12. Кнопки збереження даних

Кнопка "Зберегти результати розрахунку" дозволяє зберегти результати розрахунку у форматі HTML. Цей файл можна використовувати для документування, зберігання даних та подальшого аналізу розподілу температур.

Кнопка "Зберегти графік розподілу температури вздовж осі X" – зберігає графік розподілу температури вздовж осі X. Цей графік (рис. 3.3) ілюструє, як температура змінюється вздовж зварного шва. Він допомагає проаналізувати температурні зміни вздовж горизонтальної осі, де на осі Y представлена температура в градусах Цельсія, а на осі X - положення вздовж шва в метрах. Цей графік корисний з метою оцінки температурного профілю по довжині зварного шва.

Кнопка "Зберегти графік розподілу температури у глибину матеріалу по осі Y" – зберігає графік розподілу температури по глибині матеріалу вздовж осі Y.

Цей графік (рис. 3.13) відображає зміну температури залежно від глибини матеріалу. Це дозволяє оцінити, як тепло поширюється всередину матеріалу та як воно впливає на його структуру.

Такий графік важливий розуміння теплових процесів у товщі матеріалу.

3.3.9. Побудова графіку розподілу температури вздовж осі X

На графіці зображено розподіл температури у глибину матеріалу по осі Y, див. рис.3.4.

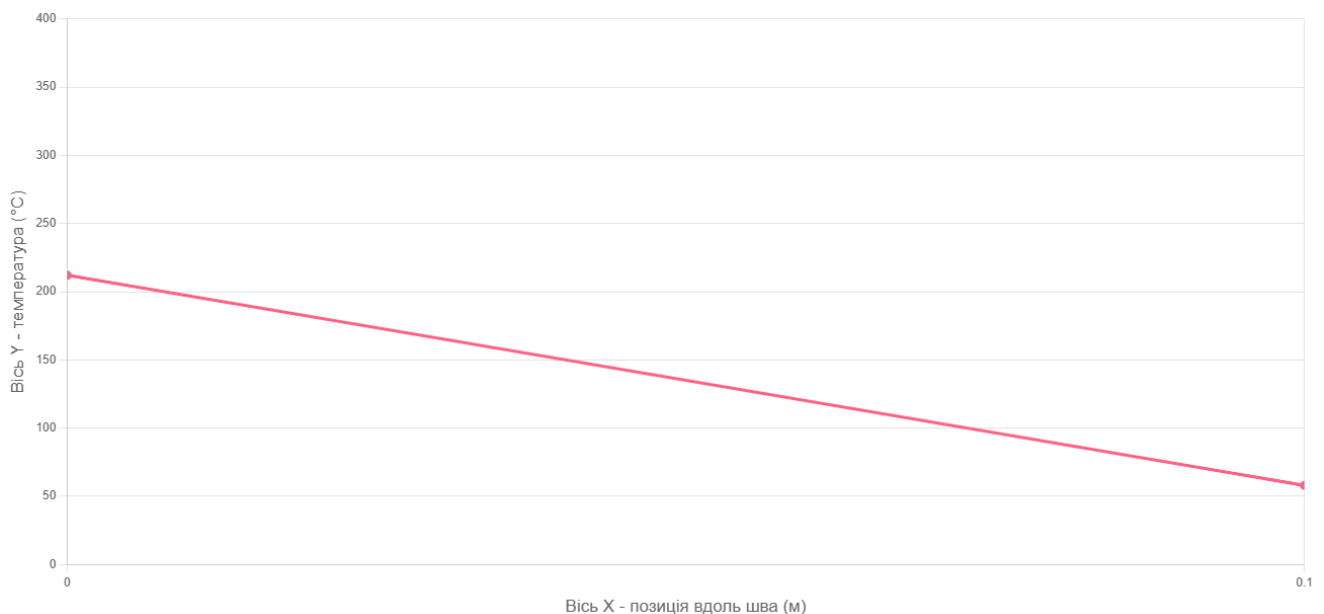


Рис.3.13. Графік розподілу температури (°C) вздовж осі X (позиція вздовж шва)

Цей графік допомагає візуалізувати, як температура розподіляється вздовж шва після зварювання. Чим далі від точки зварювання, тим холодніший матеріал.

Це важливо для розуміння зон термічного впливу, оскільки від температури залежить якість зварного з'єднання та можливі деформації металу.

Аналіз графіку:

- Зменшення температури: Температура зменшується при віддаленні від початкової точки шва. Це притаманно зварювання, оскільки тепло розсіюється при віддаленні зони зварювання.
- Початкова температура: Приблизна початкова температура в першій точці становить трохи більше ніж 200°C .
- Температурний градієнт: Лінія зменшення температури плавна, що вказує на поступове зниження температури вздовж зварного шва.
- Кінцева температура: Наприкінці осі X (приблизно 0,1 м) температура знижується приблизно до 50°C .

3.3.10. Побудова графіку розподілу температури у глибину матеріалу по осі Y

На графіці зображено розподіл температури у глибину матеріалу по осі Y, див. рис.3.14.

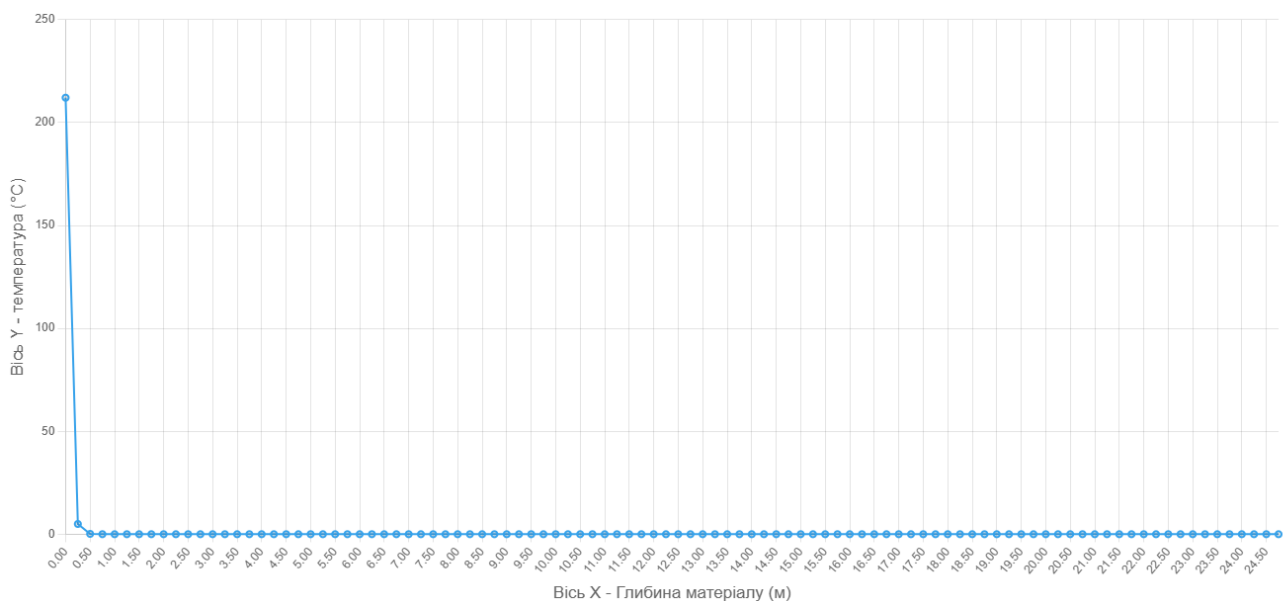


Рис.3.14. Графік розподілу температури у глибину матеріалу по осі Y ($^{\circ}\text{C}$)

Аналіз графіка:

- Вісь Y (Температура): Це температура в градусах Цельсія (°C), яка показана на вертикальній осі.
- Вісь X (Глибина матеріалу): Горизонтальна вісь показує глибину матеріалу в метрах (м).
- Різке зниження температури: У першій точці на глибині 0 м температура становить трохи більше 200 ° C, після чого вона швидко падає майже до 0 ° C при дуже малій глибині (близько 0.5 м).
- Постійна температура на більшій глибині: Починаючи з 0.5 м температура стабілізується близько 0°C і не змінюється до кінця діапазону глибини (приблизно 25 м).

Таке різке зниження температури в матеріалі вказує на те, що тепло від процесу зварювання концентрується поблизу поверхні. Це важливо для розуміння того, як тепло поширюється в глибину матеріалу та як це впливає на властивості матеріалу в зоні термічного впливу зварювання.

3.4. Розробка програмного забезпечення для розрахунку термічного циклу точки зони термічного впливу при наплавці

3.4.1. Призначення програмного забезпечення для розрахунку термічного циклу точки зони термічного впливу при наплавці

Програмне забезпечення розроблено для точного розрахунку поширення тепла під час наплавлення та впливу на температурне поле у зоні термічного впливу.

Цей розрахунок є критично важливим для забезпечення високої якості зварювальних робіт, уникнення перегріву матеріалу або недостатнього нагрівання, що може вплинути на його міцність і структуру. Програмне забезпечення дозволяє прогнозувати максимальні температури, швидкість охолодження та інші ключові параметри.

Основні напрямки розрахунку:

- Максимальна температура в ЗТВ.
- Максимальна температура впливає на глибину проникнення тепла та ступінь плавлення матеріалу. Контроль температури дозволяє уникнути надмірного

плавлення або перегріву, що може призвести до зміни структури металу і утворення тріщин.

- Термічний цикл показує зміну температури в часі після завершення процесу наплавлення.

Важливо оцінити цей цикл, щоб зрозуміти процес охолодження, який безпосередньо впливає на властивості металу в зоні термічного впливу, зокрема на його мікроструктуру та механічні характеристики.

3.4.2. Блок-схема розрахунку програмного забезпечення

Блок-схема розрахунку термічного циклу точки зони термічного впливу при наплавці представлена на рис.3.15 [5].

При збільшенні швидкості переміщення зварювального джерела градієнт температури тіла у напрямі зварювання весь час зменшується. Про це можна судити по витягнутості ізотерми температурного поля у напрямі осі Х.

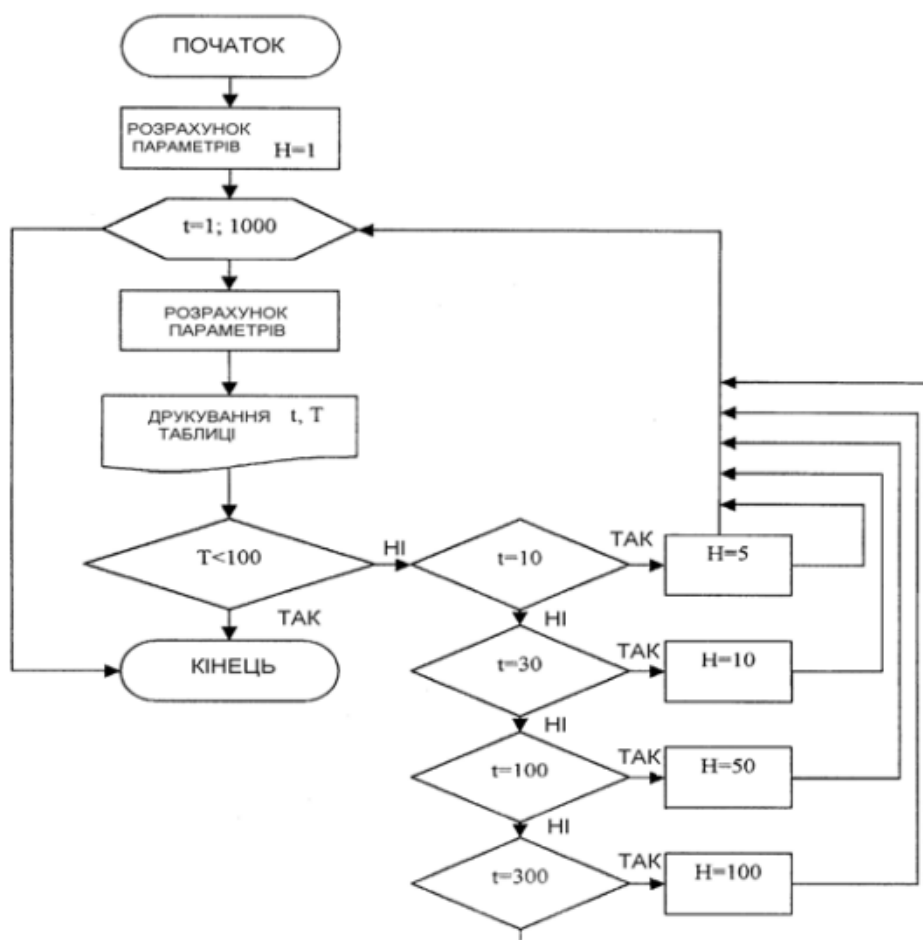


Рис.3.15. Блок-схема розрахунку термічного циклу точки зони термічного впливу при наплавці

При великих швидкостях зварювання, коли джерело тепла рухається швидко по пластині, можна припустити, що час, необхідний для теплопередачі в напрямку руху джерела, значно менший за час, потрібний для поширення тепла в перпендикулярному напрямку (в напрямку товщини пластини).

При наплавленні на масивний виріб розрахунок температури в будь-якій точці тіла в часі можна виконати за допомогою моделі теплопередачі:

$$T(r_0, t) = \frac{q}{2\pi\lambda V t} \exp\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right),$$

де:

t – час, відлічуваний з того моменту, коли джерело перетинає площину, в якій знаходиться дана точка, що має координати y_0, z_0 ; r_0 – відстань в даній площині від вибраної точки до осі переміщення джерела [7].

Зміна максимальних температур в напрямі, перпендикулярному осі переміщення джерела, розраховується по рівняннях:

- для наплавлення на масивний виріб:

$$T_m(r_0) = \frac{0.368q}{\frac{\pi}{2} V_{cy} r_0^2}$$

Таким чином, процес поширення теплоти при дії потужних зварювальних джерел, що швидко рухаються, можна описати за допомогою простих рівнянь, що справедливі лише для окремих площин, перпендикулярних осі переміщення джерела тепла.

Оскільки зварювальне джерело рухається з великою швидкістю, процеси нагріву та охолодження в різних точках тіла відбуваються асинхронно, і тому температурні поля в кожній площині змінюються лише в часі.

3.4.3. Розрахунок постійних коефіцієнтів

Розрахунок коефіцієнту коефіцієнту K_1 :

$$K_1 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \times L}$$

де K_1 - постійний коефіцієнт, який використовується для розрахунку температури. L - теплопровідність у (Вт/(м·К)).

Цей коефіцієнт використовується для визначення температури в зоні впливу. Він залежить від ефективної теплової потужності (Q) та теплопровідності матеріалу (L).

Розрахунок коефіцієнту K2:

$$K2 = -\frac{V}{2 \cdot A}$$

де

- K2 - постійний коефіцієнт, що базується на температуропровідності та швидкості зварювання.
- V - швидкість зварювання (см/с).
- A - температура в (см²/с).

K2 описує, як швидкість зварювання (V) та температуропровідність (A) впливають на зміну температури в залежності від відстані від джерела нагріву [14].

3.4.4. Розрахунок коефіцієнтів TK, R0, TH, TA, T, TAB

Розрахунок часу охолодження до 20°C TK:

$$TK = -\frac{20}{V}$$

де TK - час, за який зварювальний шов охолоджується до 20 °C (с).

Цей показник допомагає розрахувати, скільки часу потрібно, щоб зварювальний шов охолов до безпечної температури 20°C після завершення наплавлення.

Розрахунок логарифмічної відстані RO:

$$RO = -K2 \cdot R$$

- RO – логарифмічна відстань, яка враховує вплив температури залежно від відстані.
- RO характеризує вплив температури в залежності від відстані до зварювальної дуги.

Розрахунок часу нагріву TH:

$$TH = -\frac{5 - X}{V}$$

де

					КР.131.6121м.04.03.03.ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

- T_H - час нагрівання (с) від початку зварювання до певної точки
- X - координата осі X (см)
- V - швидкість зварювання (см/с)

Ця формула використовується для визначення часу, за який точка матеріалу досягає пікової температури під час зварювання.

Розрахунок час охолодження у зоні термічного впливу T_A :

$$T_A = \frac{V^2 \cdot T_H}{V}$$

де

- T_A - час охолодження у зоні термічного впливу (с).
- A - температуропровідність (см²/с).
- T_H - час нагрівання (с).

Час охолодження впливає на структуру матеріалу в зоні термічного впливу.

Цей показник залежить від температуропровідності та швидкості зварювання.

Розрахунок температури у точці T :

$$T = \frac{K_1}{R} \times e^{K_2 \cdot (X+R)}$$

де

- T - температура в градусах Цельсія (°C) у точці в момент часу.
- e - основа натурального логарифму.

Розрахунок часу охолодження T_{AB}

Якщо температура T менша або дорівнює 100°C:

$$T_{AB} = \frac{V^2 \times (T_H - T_K)}{4 \cdot A}$$

де T_{AB} - час охолодження (с) при температурі менше або дорівнює 100°C.

Ця формула використовується для визначення температури у конкретній точці матеріалу на момент часу.

3.4.5. Веб-інтерфейс програмного забезпечення

Веб-інтерфейс ПЗ містить поля для введення різних параметрів, таких як:

- λ – коефіцієнт теплопровідності

- α – коефіцієнт температуропровідності
- V – швидкість зварювання, вимірюється у см/с.
- c_y – об'ємна теплоємність
- I та U – струм і напруга зварювання
- ККД – коефіцієнт корисної дії зварювальної системи, виражений у відсотках.

Зовнішній вигляд веб-інтерфейсу ПЗ представлений на рис. 3.16.

Після натискання на кнопку "Розрахувати" таблиця результатів (див. табл. 3.8) надає дані про температурні характеристики в певних точках навколо зварного шва.

Ці дані можуть бути корисними для оцінки міцності, деформації та стійкості матеріалу після зварювання. Таблиця складається з кількох блоків, де кожен блок відповідає певній координаті по осі Y , тобто відстані від зварного шва у вертикальному напрямку. Рядки таблиці відповідають різним значенням X , які представляють горизонтальну відстань від зварної точки.

Введіть струм зварювання (I), А:

250

Введіть напругу зварювання (U), В:

24

Введіть ККД процесу (%):

80

Введіть швидкість зварювання (V), см/с:

1

Введіть коефіцієнт температуропровідності (α), $\text{см}^2/\text{с}$:

0.97

Введіть коефіцієнт теплопровідності (λ), $\text{Дж}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$:

0.38

Введіть координату Y при температурі 1350°C :

10

Розрахувати

Рис.3.16. Веб-інтерфейс ПЗ для розрахунку термічного циклу точки зони термічного впливу при наплавці

					КР.131.6121м.04.03.03.ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

Таблиця 3.8. Розподіл температури та теплових характеристик у зоні термічного впливу при зварюванні

X	RO	TA	T	TH	TAB
4.00	5.552	0.26	0.09	1.00	-4.90
3.00	5.382	0.52	0.19	2.00	-4.64
2.00	5.257	0.77	0.37	3.00	-4.38
1.00	5.180	1.03	0.67	4.00	-4.12
0.00	5.155	1.29	1.16	5.00	-3.87
-1.00	5.180	1.55	1.88	6.00	-3.61
-2.00	5.257	1.80	2.88	7.00	-3.35
-3.00	5.382	2.06	4.16	8.00	-3.09

Стовпці таблиці та їх значення:

- X - координата вздовж осі X у сантиметрах, яка показує горизонтальну відстань від точки зварювання за напрямом руху зварювальної дуги.

- RO - відстань логарифму (R). Значення RO показує вплив температури в залежності від відстані від точки спостереження до зварювальної дуги.

- TA - час охолодження в зоні термічного впливу, вимірюється у секундах.

Цей показник демонструє, як швидко знижується температура у певній точці.

- T - температура у °C в точці на момент часу, що дає інформацію про розподіл тепла вздовж зварювального шва.

- TH - час нагріву у секундах від початку зварювання до певної точки, що показує проходження тепла від зварювальної дуги.

- TAB - час охолодження у секундах, що розраховується, коли температура в точці нижча або дорівнює 100°C. Це дозволяє оцінити рівень охолодження при досягненні критичних температур.

Таким чином, таблиця 3.8 дозволяє оцінити тепловий вплив зварювання на матеріал, даючи змогу зрозуміти, як температура змінюється на різних відстанях від зварного шва.

Також у веб-інтерфейсі є кнопки для додаткових дій:

- Кнопка "Зберегти результати розрахунку" (див. рис. 3.17) дозволяє зберегти отримані результати розрахунку у вигляді файлу. Цей файл може бути використаний для подальшого аналізу даних, документування або збереження інформації про проведені обчислення.

- Кнопка "Зберегти графік розрахунку термічного циклу точки ЗТВ при наплавці" (див. рис. 3.17) зберігає графік, що показує зміну температури у зоні термічного впливу (ЗТВ) під час наплавки.

Цей графік (див. рис. 3.18) допомагає візуалізувати термічний цикл та аналізувати температурні коливання в зоні зварювання.

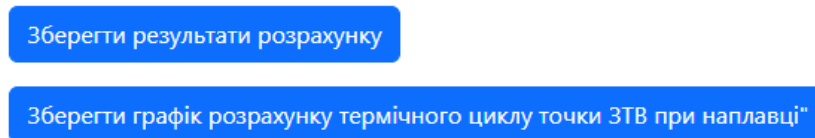


Рис.3.17. Кнопки збереження даних

3.4.6. Графік розрахунку термічного циклу точки ЗТВ при наплавці

Графік (див. рис. 3.18.) відображає зміни температури у точці зони термічного впливу залежно від часу з моменту початку наплавлення.

По осі X вказано час (у секундах), починаючи з початку процесу наплавлення.

По осі Y представлена температура у точці ЗТВ (у градусах Цельсія).

Аналіз графіка:

- Початкове зростання температури (від 0 до 10 секунд):

Температура починає швидко рости з початку наплавлення.

Цей етап відповідає фазі нагріву металу у зоні термічного впливу під впливом джерела тепла (зварювальна дуга). Зростання температури відбувається до досягнення пікового значення.

- Пік температури (близько 10 секунд). У графіку (див. рис. 3.18.) видно, що максимальна температура точці ЗТВ досягає близько 28°C. Цей пік вказує на момент максимальної дії тепла на матеріал.

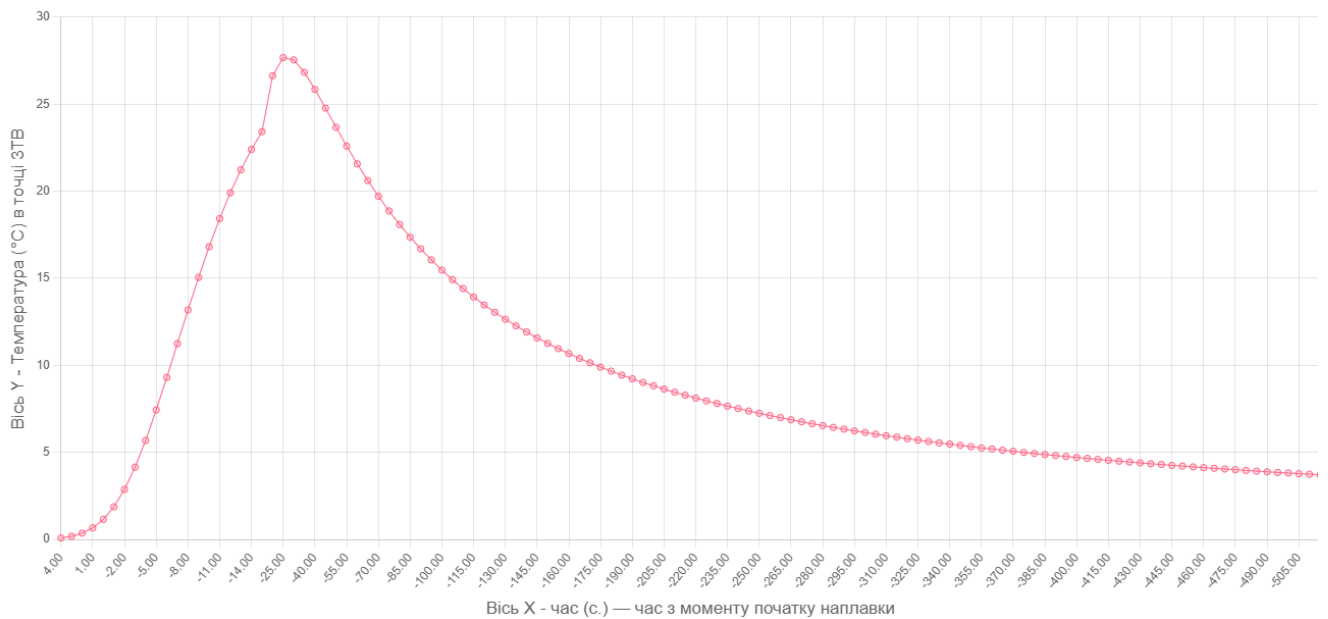


Рис.3. 18. Графік розрахунку термічного циклу точки ЗТВ при наплавці

Важливо, що залежно від матеріалу та параметрів зварювання цей пік може змінюватись.

- Період охолодження (після піку до кінця графіка):

Після досягнення піку температури починається процес охолодження металу.

Графік демонструє плавне зниження температури, що з видаленням джерела тепла і розсіюванням енергії у матеріалі.

Температура поступово повертається до кімнатної (близько 20 ° C).

Охолодження продовжується протягом усього часу після завершення нагріву, що видно з повільного зниження температури аж до кінця періоду спостереження.

3.5. Розробка програмного забезпечення для розрахунку термічного циклу точки зони термічного впливу при зварюванні пластин

3.5.1. Призначення програмного забезпечення для розрахунку термічного циклу точки зони термічного впливу при зварюванні пластин.

ПЗ розроблено для моделювання термічного циклу під час зварювання пластин, що дозволяє аналізувати поширення тепла в матеріалі та його вплив на температурне поле у зоні термічного впливу.

Цей розрахунок має вирішальне значення для забезпечення точності зварювальних процесів, а також для уникнення небажаних наслідків, таких як перегрів або недостатнє нагрівання матеріалу.

ПЗ здатна прогнозувати максимальні температури, час охолодження, а також інші важливі термічні характеристики.

Основні напрямки розрахунку:

- Максимальна температура в ЗТВ

Цей параметр визначає глибину проникнення тепла та ступінь плавлення зварювального матеріалу. Контроль максимальної температури дозволяє уникнути надмірного плавлення, що може призвести до структурних змін в металі, таких як тріщини.

- Термічний цикл

Програмне забезпечення дозволяє відстежувати зміну температури в часі після завершення процесу зварювання. Це важливо для розуміння охолодження, яке безпосередньо впливає на мікроструктуру та механічні властивості зварного з'єднання.

3.5.2. Блок-схема розрахунку програмного забезпечення

Блок-схема розрахунку термічного циклу точки зони термічного впливу при зварюванні пластин представлена на рис.3.19.

Термічний цикл для будь-якої точки зварювальних пластин в будь-який момент часу в процесі зварювання можна розрахувати за залежністю [5]:

$$T(x, y, t) = T_{\text{пр}}(r, x) \Psi_2(\rho_2, t_2)$$

В розрахунках точка нерухома, а система координат переміщується разом з джерелом по осі x .

Для розрахунку термічного циклу точки, яку нагрівають до 1350 °C і яка знаходиться на відстані 5 см від початку руху джерела, необхідно скористатися графіком, який показаний на рис. 2.2. За допомогою графіка знайдемо y_0 .

Координата x по мірі руху джерела змінюється від 5 см в момент початку зварювання ($t = 0$) до -15 см при її закінченні ($t = 0$).

Цей період часу називають періодом теплонасичування. У цей час температура в точці зварювання поступово підвищується до максимальної, визначеної впливом зварювального джерела.

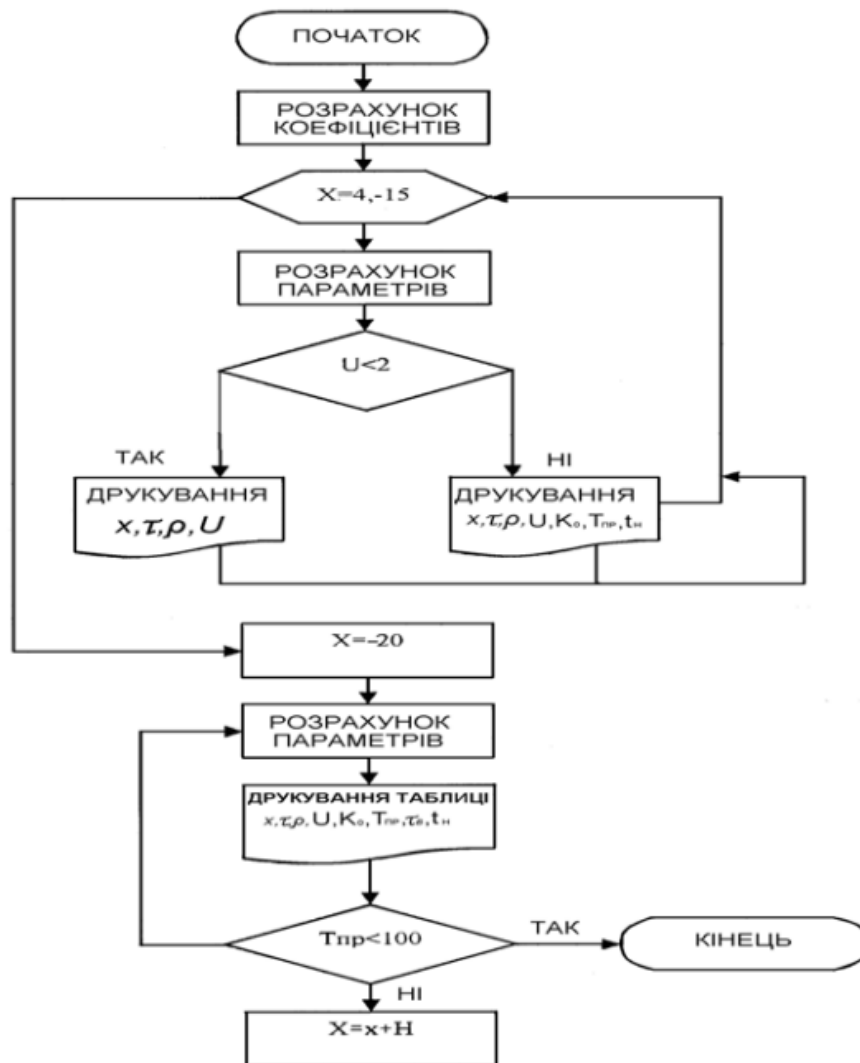


Рис.3.19. Блок-схема розрахунку термічного циклу точки зони термічного впливу при зварюванні пластин

Починаючи з часу закінчення зварювання t_k настає період вирівнювання температур. В цьому періоді припустимо, що джерело як би продовжує рухатися далі у напрямі осі x , а щоб ліквідувати його дію, одночасно у момент закінчення зварювання t_k введемо стік теплоти такої ж потужності, як і джерело.

Це дозволяє проводити розрахунок зміни температури в будь-якій точці в період вирівнювання за тими ж законами, що і для періоду теплонасичування, але з урахуванням дії стоку теплоти.

Температуру в періоді вирівнювання можна розглядати як алгебраїчну суму температур: $T(t)$ – від зварювального джерела, що ніби продовжує діяти, та $T(t - t_k)$ – від стоку теплоти по потужності рівного зварювальному, що розпочав діяти у момент часу t_k :

$$T_B(t) = T(t) - T(t - t_k) = T_{пр}[\Psi_2^{ДЖ}(\rho_2^{ДЖ}, \tau_2^{ДЖ}) - \Psi_2^{СТ}(\rho_2^{СТ}, \tau_2^{СТ})]$$

де $\Psi_2^{ДЖ}(\rho_2^{ДЖ}, \tau_2^{ДЖ})$ - коефіцієнт теплонасичування даної точки для як би продовжуємого діяти зварювального джерела; $\Psi_2^{СТ}(\rho_2^{СТ}, \tau_2^{СТ})$ - коефіцієнт теплонасичування для тієї ж точки від стоку теплоти, що почав діяти з часу t_k .

Час t для даного задачі можна розрахувати по формулі $t = (5 - x) / v$.

3.5.3. Розрахунок постійних коефіцієнтів

Для подальшого аналізу програмне забезпечення розраховує постійні коефіцієнти $K1$ і $K2$, які враховують вплив теплопровідності (λ) і температуропровідності (α) на розподіл температури у ЗТВ.

Розрахунок виконується за формулами:

$$K1 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L}$$

$$K2 = \frac{V}{2 \cdot \alpha}$$

де:

- $K1$ - постійний коефіцієнт, що впливає на глибину теплового проникнення.
- $K2$ - постійний коефіцієнт, що враховує швидкість зварювання і температуропровідність. Цей розрахунок важливий для точного моделювання термічного циклу і прогнозування температури в різних точках зварного шва.

3.5.4. Розрахунок констант $K4$, $K5$

Допоміжна константа для подальших обчислень $K4$ обчислюється за формулою:

$$K4 = \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot K3}}$$

де:

- К4 – допоміжна константа, що враховує вплив радіальної координати на розподіл температури.

- π – математична константа

- К3 – константа, яка враховує швидкість зварювання та теплопровідність у радіальному напрямку.

Цей розрахунок використовується для подальшого моделювання температурного поля зварювального шва, враховуючи складну геометрію процесу.

Константа теплопередачі та швидкості К5.

Константа, що залежить від швидкості зварювання та коефіцієнту теплопередачі К5, розраховується за формулою:

$$K5 = \frac{V^2}{4 \cdot A} + B$$

де:

- V - швидкість зварювання у см/с.

- A - коефіцієнт теплопровідності у см²/с.

- B - коефіцієнт тепловіддачі у Вт/(м²·К).

Ця константа важлива для точного моделювання теплових процесів під час охолодження зварного шва, враховуючи вплив швидкості зварювання і тепловіддачі на розподіл температур.

3.5.5. Розрахунок часу охолодження ТК, температури у точці Т

Програмне забезпечення обчислює час охолодження (ТК) зварювального шва до заданої температури (наприклад, 20°C).

Розрахунок виконується за формулою:

$$TK = \frac{-20}{V}$$

де:

- ТК - час, за який зварювальний шов охолоджується до 20 °С (с).

- V - швидкість зварювання у см/с.

Цей показник допомагає оцінити, скільки часу потрібно для охолодження зварювального шва до безпечної температури 20 °С після завершення зварювання.

Остаточний розрахунок температури у конкретній точці Т виконується за формулою:

$$TK = \frac{K1}{R} \cdot e^{(K2 \cdot (X+R))}$$

де:

- Т – температура (°С) у точці в момент часу.
- K1 - постійний коефіцієнт, що враховує ефективну теплову потужність і теплопровідність.
- R - відстань від точки спостереження до зварювальної дуги (м).
- K2 - постійний коефіцієнт, що враховує вплив температуропровідності та швидкості зварювання.
- X - координата осі X (см).
- e - основа натурального логарифму.

Цей розрахунок дозволяє оцінити вплив зварювального процесу на термічні характеристики матеріалу в конкретній точці, що є критично важливим для забезпечення якості зварного з'єднання.

3.5.6. Веб-інтерфейс програмного забезпечення

Веб-інтерфейс ПЗ містить поля для введення різних параметрів, таких як:

- I - струм зварювання, U - напруга зварювання
- ККД - коефіцієнт корисної дії
- V - швидкість зварювання
- α - коефіцієнт температуропровідності
- λ - Коефіцієнт теплопровідності
- Y - координата при температурі 1350 °С, що використовується для точного розрахунку температури в конкретній точці.
- В - коефіцієнт температуровіддачі в Вт/(м²·К), що впливає на теплову втрату матеріалу в навколишнє середовище.

- D - товщина листа в см, що визначає геометричні характеристики зварювального з'єднання.

Зовнішній вигляд ПЗ представлений на рис. 3.20.

Після натискання на кнопку "Розрахувати" таблиця результатів (див. табл. 3.9) надає дані про температурні характеристики у визначених точках навколо зварного шва.

Ці результати показують розподіл температури вздовж осі X і відображають процес нагрівання та охолодження металу в зоні термічного впливу.

Це дозволяє зрозуміти, як тепло поширюється в матеріалі, поступово знижується з віддаленням від шва, та де відбуваються зміни температурного градієнта.

Отримані дані можуть бути корисними для оцінки міцності, деформації та довговічності матеріалу після зварювання.

Опис стовпців таблиці та їх значення:

- X - відстань вздовж осі X у сантиметрах, що відображає горизонтальну відстань від початку зварювання по напрямку руху зварювальної дуги.

В результатах таблиці видно, що температура і тепловий вплив знижуються з ростом значення X, що вказує на поступове охолодження металу в міру віддалення від початкової точки нагріву.

- RO - радіальна координата, що позначає відстань від осі зварного шва у метрах. Вона вказує, як температура змінюється з віддаленням від центру зварного шва.

В результатах таблиці 3.9. видно, що значення RO майже не змінюється, що означає, що температура вимірюється вздовж однієї і тієї ж радіальної відстані від осі зварного шва. Це допомагає зосередитись на змінах температури вздовж довжини шва (по осі X), залишаючи поперечну координату стабільною.

Введіть струм зварювання (I), А:

Введіть напругу зварювання (U), В:

Введіть ККД процесу (%):

Введіть швидкість зварювання (V), см/с:

Введіть коефіцієнт теплопровідності (α), $\text{см}^2/\text{с}$:

Введіть коефіцієнт теплопровідності (λ), $\text{Дж}/(\text{см}\cdot\text{с}\cdot\text{К})$:

Введіть координату Y при температурі 1350 °С:

Введіть коефіцієнт температуровіддачі (B), $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$:

Введіть товщину листа D, см :

Розрахувати

Рис.3.20. Веб-інтерфейс ПЗ розрахунку термічного циклу точки зони термічного впливу при зварюванні пластин

- ТА - час нагрівання до певної температури в точці, яка знаходиться під впливом тепла зварювального процесу. Це значення показує тривалість впливу високої температури.

З часом нагрівання (див. табл. 3.9) видно, що з віддаленням від початку зварювання процес нагріву триває коротше, оскільки тепло швидко розсіюється. На перших позиціях ($X = 0.00$) нагрівання триває найдовше.

- U - показник термічної дії, що відображає інтенсивність теплового впливу на метал у точці на певній відстані від шва. Менші значення означають менший тепловий вплив.

На початку таблиці 3.9 значення U є найвищим, а потім поступово знижується, що відповідає зниженню температурного впливу при віддаленні від шва.

- T - температура металу в точці в градусах Цельсія. Це температура, якої метал досягає в конкретній точці під впливом тепла від зварювання.

З таблиці 5.1 видно, що при зміщенні вздовж осі X температура поступово знижується, що свідчить про процес охолодження металу. Це очікувано, оскільки тепло поступово розсіюється від зварного шва в навколишній матеріал.

- TH - час охолодження металу у секундах. Він показує, скільки часу потрібно для охолодження металу після зупинки зварювального процесу. З таблиці 5.1 видно, що з кожним кроком вздовж осі X час охолодження стає дещо коротшим, що свідчить про поступове зниження температури.

- TAB - температурна різниця у градусах Цельсія на секунду. Це зміна температури між двома моментами охолодження, що показує швидкість зниження температури. У міру охолодження металу показник "TAB" також змінюється, що свідчить про швидкість зміни температури.

На початку процесу "TAB" більша, а далі поступово знижується, що відповідає природному уповільненню охолодження матеріалу.

Таблиця 3.9. Результати розрахунку термічного циклу точки зони термічного впливу під час зварювання

X	RO	TA	U	T	TH	TAB
0.00	266.67	266.67	266.67	732.61	5.00	400.00
0.10	266.68	261.33	266.68	732.61	4.90	402.67
0.20	266.72	256.00	266.72	732.60	4.80	405.33
0.30	266.79	250.67	266.79	732.59	4.70	408.00
0.40	266.88	245.33	266.88	732.57	4.60	410.67
0.50	267.00	240.00	267.00	732.54	4.50	413.33
0.60	267.15	234.67	267.15	732.51	4.40	416.00

У веб-інтерфейсі також передбачено кнопки для додаткових дій:

Кнопка "Зберегти результати розрахунку" (див. рис. 3.21) дозволяє зберегти отримані результати розрахунків у вигляді файлу. Цей файл можна використовувати для подальшого аналізу, документування або збереження інформації про виконані обчислення. Це особливо зручно для фахівців, які хочуть зберегти дані для майбутнього використання або порівняння з іншими розрахунками.

Кнопка "Зберегти графік залежності температури від позиції вздовж зварного шва" (див. рис.3.21) зберігає графік, який ілюструє зміну температури вздовж зварного шва.

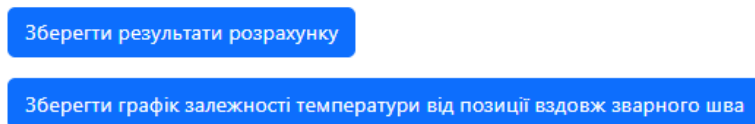


Рис.3.21. Кнопки збереження даних

3.5.7. Побудова графіку розрахунку залежності температури від позиції вздовж зварного шва

Графік відображає залежність температури від позиції вздовж зварного шва, див. рис. 3.22.

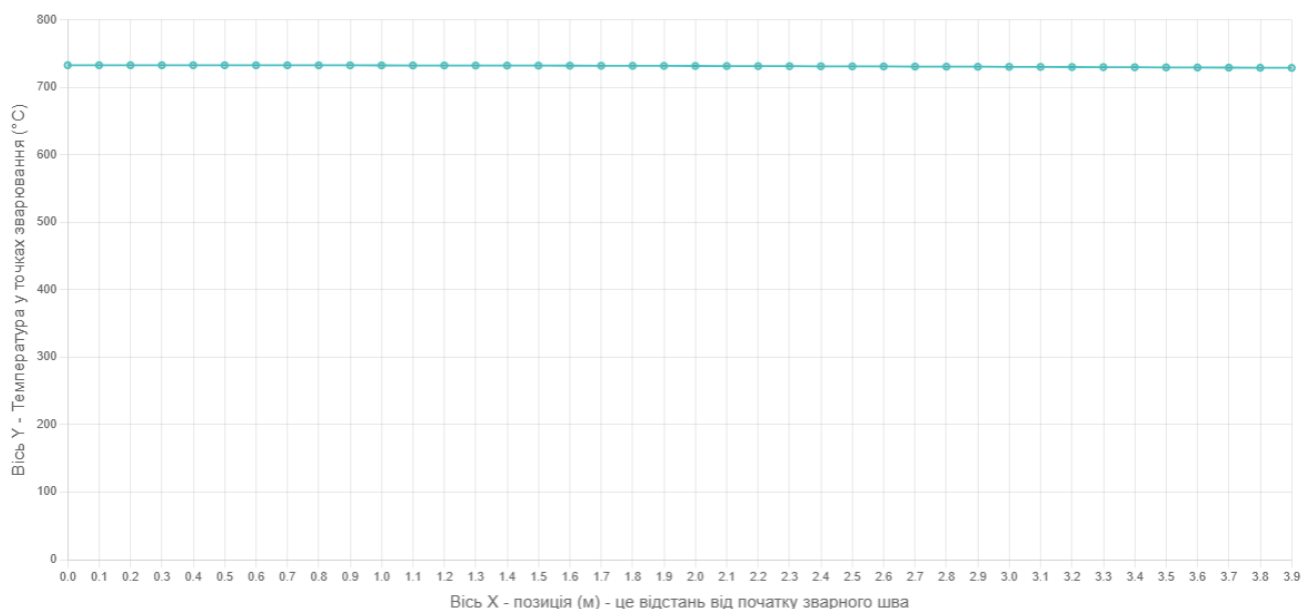


Рис.3.22. Графік розрахунку залежності температури від позиції вздовж зварного шва

На осі X позначено положення (у метрах), яке відповідає відстані від початку зварного шва.

На осі Y представлена температура у точках вздовж шва в градусах Цельсія (°C).

Аналіз графіка:

- Температура в усіх точках зварного шва залишається практично стабільною на рівні близько 700 °C. Це видно з того, що всі точки даних утворюють горизонтальну лінію на графіку, без значних коливань.
- Положення точок на осі X варіюється від 0 м до приблизно 3.9 м, але температура у всіх точках залишається майже однаковою.
- Такий результат може свідчити про рівномірний розподіл температури вздовж зварного шва, що може бути досягнуто стабільним процесом зварювання з постійною потужністю тепла.

Висновки

Розроблене програмне забезпечення для розрахунку температурного поля при наплавленні у зварювальних процесах. Воно допомагає оцінити розподіл температури поблизу зварного шва, що має критичне значення для розуміння якості та надійності зварного з'єднання.

Основні функції та можливості:

1. Введення параметрів: Користувач може вводити ключові параметри зварювання, такі як:

- Початкова температура матеріалу.
- Швидкість зварювання.
- Зварювальний струм та напруга.
- ККД процесу.
- Коефіцієнти температуропровідності та теплопровідності матеріалу.
- Відстань Y від зварювального шва для аналізу температурного

розподілу.

2. Розрахунок температурного поля. На основі введених даних програма виконує розрахунок температурного розподілу в зоні зварювання, надаючи значення

					КР.131.6121м.04.03.03.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

температури у різних точках, віддалених від зварного шва. Ці результати відображаються в табличній формі для кожної введеної координати Y.

3. Побудова графіка. Програма також будує графік розподілу температури вздовж лінії зварного шва, що відображатиме залежність температури від відстані від шва. Цей графік допомагає наочно оцінити, як температура зменшується при віддаленні від зони нагріву, що дозволяє краще зрозуміти, як змінюється температурне поле вздовж зварного з'єднання.

4. Збереження результатів та графіка. В інтерфейсі є кнопки для збереження як числових даних розрахунків, так і графіка розподілу температури. Це дозволяє користувачеві зберегти результати для подальшого аналізу, документування чи використання звітів.

Розроблене програмне забезпечення для розрахунку термічних процесів при наплавленні на масивний виріб у зварюванні дозволяє точно моделювати тепловий вплив зварювального джерела на матеріал виробу. Врахування таких ключових параметрів, як теплопровідність, температуропровідність, швидкість зварювання, об'ємна теплоємність, максимальна температура, потужність зварювального струму і напруги, а також коефіцієнт корисної дії, забезпечує точність розрахунків і дозволяє оцінити ефективність процесу наплавлення.

Програмне забезпечення дає змогу проводити розрахунок:

1) Максимальної температури у різних точках віддаленості від лінії зварювання, що допомагає запобігти перегріву чи недостатньому нагріванню масивних деталей. Це досягається через обчислення зниження температури з віддаленням від точки зварювання.

2) Термічного циклу - зміни температури з часом після завершення зварювання. Моделювання термічного циклу дає змогу оцінити охолодження і термічну стабільність наплавленого шару, що є важливим для забезпечення якості зварного шва і зносостійкості обробленої поверхні.

Реалізована динамічна зміна кроку для часової змінної ТВ у розрахунку термічного циклу дозволяє адаптувати розрахунки до різної швидкості охолодження на різних етапах, що підвищує точність моделі.

Крім цього, веб-інтерфейс програмного забезпечення забезпечує зручний спосіб введення параметрів та відображення результатів у вигляді таблиць, що дозволяє користувачу швидко оцінювати температурні значення в різних точках та на різних етапах процесу. Це також спрощує аналіз і прийняття рішень щодо оптимізації параметрів зварювання для досягнення необхідних механічних властивостей і зносостійкості наплавленого шару.

Таким чином, розроблене ПЗ для розрахунку термічних процесів при наплавленні на масивний виріб у зварюванні є ефективним інструментом для розрахунків при наплавленні масивних виробів, що дозволяє підвищити якість і надійність зварних з'єднань.

Розроблене програмне забезпечення для розрахунку температурного поля при зварюванні відіграє важливу роль у забезпеченні точності зварювальних процесів та допомагає уникати дефектів, пов'язаних із перегріванням чи недостатнім нагрівом металу.

ПЗ вводять такі параметри, як зварювальний струм, напругу, ККД, швидкість зварювання, товщину листа, коефіцієнти теплопровідності, температуровіддачі та теплопровідності, що дає можливість точно розрахувати термічний цикл у точках зварювання. Результати можуть бути використані для оптимізації процесів і покращення якості кінцевих виробів.

Основні напрямки розрахунку:

- Обчислення розподілу теплового потоку в матеріалі залежно від його геометрії, товщини та теплопровідних властивостей.
- Врахування параметрів процесу (струм, напруга, швидкість зварювання), що впливають на ефективність передачі тепла до металу.
- Оцінка впливу навколишніх умов (коефіцієнт тепловіддачі), що визначають швидкість відведення тепла від поверхні матеріалу.
- Визначення глибини та ширини зони розплавленого металу в залежності від параметрів зварювання.
- Аналіз впливу швидкості зварювання на форму зварного шва та розмір зони проплавлення.

- Обчислення температурних градієнтів у зоні зварювання для визначення потенційних зон термічних напружень.
- Визначення областей, де можливі утворення тріщин або залишкових напружень через нерівномірний розподіл температури.
- Підбір оптимальних параметрів (струму, напруги, швидкості зварювання) для забезпечення рівномірного розподілу температури та мінімізації термічних деформацій.
- Оцінка впливу змін параметрів на якість зварного з'єднання, зокрема на формування структури матеріалу.
- Побудова графіків температурного поля вздовж зварного шва та у вибраних точках ЗТВ.
- Візуальний аналіз залежностей температури від часу та позиції для полегшення інтерпретації результатів.

Розроблене програмне забезпечення для розрахунку термічного циклу у зоні термічного впливу під час процесу наплавлення дозволяє визначити та контролювати основні параметри, такі як максимальна температура, швидкість охолодження, час охолодження до безпечної температури та інші ключові показники. Це важливо для запобігання перегріву або недостатньому нагріванню матеріалу, що може суттєво вплинути на його структурні та механічні властивості.

ПЗ використовує вихідні дані, що описують матеріал та умови зварювання, і дозволяє розрахувати різноманітні коефіцієнти та параметри, пов'язані з тепловим впливом зварювального процесу. Зокрема, вона дозволяє обчислити теплову потужність, температуропровідність та час охолодження у різних точках матеріалу, що є важливим для забезпечення якості зварного з'єднання.

Завдяки точному розрахунку температурних змін у часі (термічному циклу), програма надає можливість детально аналізувати температурний режим у ЗТВ, що сприяє оптимізації зварювального процесу та покращенню його результатів.

Отримані дані та графічні результати можуть бути використані для документування, планування зварювальних робіт і подальшого аналізу теплових впливів на структуру матеріалу.

Розроблене програмне забезпечення для розрахунків температурного поля в зоні термічного впливу під час зварювання дозволяє проводити детальний розрахунок температурного поля в ЗТВ.

Завдяки інтерфейсу зручного вводу параметрів (струм, напруга, ККД, швидкість зварювання, температуропровідність, теплопровідність та інші характеристики), користувач може швидко налаштувати модель для різних умов зварювання.

Програмне забезпечення забезпечує ефективний спосіб збереження результатів розрахунків та графіків, що дозволяє повторно використовувати дані для подальшого аналізу або звітності.

Збереження графіка температурного розподілу вздовж зварного шва дає можливість візуалізувати термічні процеси, що значно полегшує розуміння характеру нагріву та охолодження матеріалу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В роботі було розроблено програмне забезпечення на мові програмування JavaScript для моделювання та розрахунку поширення тепла під час зварювальних процесів та його впливу на температурне поле навколо зони наплавлення.

Основна мета - забезпечити точний розрахунок температурного поля, що дозволяє уникнути дефектів у зварних швах через перегрів або недостатнє нагрівання.

Розроблене програмне забезпечення охоплює п'ять основних напрямків і має такі ключові функції:

- Розрахунок температурного поля у зоні зварювання, що враховує змінні параметри, такі як зварювальний струм, напруга, швидкість зварювання, а також температуропровідність і теплопровідність матеріалу. Це дозволяє аналізувати, як змінюється температура у різних точках матеріалу відносно зварного шва.

- Моделювання термічного циклу в процесі наплавлення, включаючи максимальну температуру, швидкість охолодження та час досягнення безпечної температури. Це допомагає запобігти залишковим напруженням і деформаціям у матеріалі та забезпечити стабільність властивостей наплавленого шару.

- Аналіз теплового впливу на матеріал, що дозволяє визначити форму і розміри зони розплавлення та зони термічного впливу. Програма допомагає оцінити температурні градієнти і зони можливих тріщин або залишкових напружень, що впливає на надійність і зносостійкість зварного з'єднання.

- Візуалізація результатів розрахунків, яка включає побудову графіків температурного поля та розподілу тепла вздовж зварного шва. Графіки забезпечують наочне представлення термічних процесів, що спрощує аналіз і прийняття рішень для оптимізації параметрів зварювання. Графіки будуються за допомогою JavaScript бібліотеки Chart.js.

- Збереження результатів та графіків у вигляді таблиць і графічних зображень, що дозволяє проводити подальший аналіз і документувати результати зварювальних процесів.

Завдяки розробленому програмному забезпеченню стало можливим детально оцінити теплові процеси при зварюванні, що допомагає забезпечити оптимальні параметри зварювання для покращення якості з'єднання та запобігання дефектам.

					КР.131.6121м.04.03.00.ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		97

					КР.131.6121м.04.03.00.ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.	Галата В.В.				Список використаних джерел				Літ.	Арк.	Аркушів	
Керівник	Лабарткава А.В											
Консультант									НУК			
Н. Контр.												
Зав. каф.												

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лебедев А.А., Казанцев А.І. Температурні поля у зварювальних з'єднаннях. Зварювання та діагностика [Текст]. - 2021. - №3. – с. 45–50.
2. В. М. Коперсак. Теорія процесів зварювання. Джерела нагрівання та теплові процеси при зварюванні [Текст] . - Київ : НТУУ «КП», 2011. - 384 с.
3. О. А. Сливінський, В. М. Коперсак. Дослідження теплових процесів у зварюванні та наплавленні [Текст]. Київ: КП ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 62 с.
4. Михайлишин М., Семенишин Г. "Математичне моделювання температурних полів, що виникають при зварюванні тонких пластин". Збірник тез доповідей XV наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 14-15 грудня 2011 р. – Тернопіль: ТНТУ, [Текст]. - 2011. – с. 11.
5. Лебедев Ю.М., Лебедева В.Ф. Оптимизация расчетов на ЭВМ тепловых процессов сварки. Сварочное производство [Текст]. – 1988. – № 5.
6. Лебедев Ю.М. Влияние состава стали на формирование структуры ЗТВ сварных соединений. Автоматическая сварка [Текст]. – 1999. – № 11.
7. Сливінський О.А., Коперсак В.М. Теорія процесів зварювання. Розрахунково-графічна робота [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 131 "Прикладна механіка" / КП ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КП ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 62 с.
8. Лебедев Ю.М. Алгоритми розрахунку умов зварюваності низьколегованих гартівних сталей залежно від їх складу та вихідної структури. У кн. Математичне моделювання та інформаційні технології у зварюванні та споріднених процесах. Під ред. проф. В.І. Махненка. Зб. праць міжнародної конференції, вересень 2004, смт Кацивелі, Крим, Україна [Текст]. – с. 145 – 150.
9. О.Берлов. "Розрахунок температурних полів складених конструкцій у зварюванні". Інституційний репозитарій ТНТУ імені Івана Пулюя [Текст]. 2007. - 10 с.

10. Лебедев Ю.М., Лебедева В.Ф., Самохин С.М. Методические указания к выполнению курсовой работы "Расчеты тепловых процессов при сварке". - Николаев: НКИ [Текст], 1991.
11. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1952.
12. Теория сварочных процессов / Под ред. В.В. Фролова [Текст]. – М: Высшая школа, 1988.
13. Шоршоров М.Х., Белов В.В. Фазовые превращения и изменение свойств стали при сварке [Текст]. – М: Наука, 1972
14. Патон Б.Є. Дослідження з теорії зварювання // Збірник праць Інституту електрозварювання ім. О.О. Патона [Текст]. – Київ: Наукова думка, 2020. – Вип. 89. - с. 15-22.
15. Юнусов Р.А. Математичне моделювання теплових процесів у зварюванні [Текст]. – Уфа: Вид-во УГНТУ, 2012. – 288 с.
16. Калінін Е.Н., Усов Ю.П. Теплові процеси та напруження при зварюванні [Текст]. – Москва: Машинобудування, 2010. – 312 с.
17. Розенталь Г. Теория сварки [Текст]: Теоретическое исследование температурных полей при сварке. – Москва: Машиностроение, 1946. – 342 с.
18. Тимошенко С.П. Теорія зварювання металів [Текст]. – Київ: Наукова думка, 2001. – 330 с.
19. Дмитрієв С.Г. Сучасні методи розрахунку теплових процесів при зварюванні. Журнал «Сварка» [Текст], 2020, № 12. – с. 34-40.
20. Кривенко О.В., Кавун М.В. Моделювання температурних полів при зварюванні матеріалів з різними властивостями [Текст]. Журнал "Технології матеріалів", 2019, № 6. – с. 22-29.
21. Єфремов В.Ф., Луговий Ю.О. Теплові процеси при зварюванні та наплавленні. Журнал «Технології зварювання»[Текст], 2018, № 4. – с. 45-50.
22. Морозов Ю.А. Практика зварювання [Текст]. – Москва: МДУ, 2005. – 270 с.
23. Тимченко В.П., Пушкар Л.М. Визначення температурних полів при зварюванні пластин з різною товщиною. Наукові праці Таврійського університету [Текст], 2017, № 2. – с. 12-15.

24. Герасименко В.Ю., Савчук О.С. Моделювання процесів охолодження зварювальних швів. Журнал «Механіка і матеріалознавство» [Текст], 2019, № 9. – с. 70-74.
25. Шмідт Р., Гейзер М. Основи теплотехніки. Теорія теплообміну при зварюванні [Текст]. – Берлін: Наука, 1991. - с. 10-15.