

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА
ХЕРСОНСЬКИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра зварювання

«Допущений до захисту»

В.о. завідувача кафедри



к.т.н., доцент М.В. Матвієнко

«__» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістра»

на тему: Дослідження напружено-деформованого стану мідно-графітових
вузлів при різних режимах охолодження

Виконав: студент VI курсу, групи 6121м
зі спеціальності 132 Матеріалознавство
за освітньо-професійною програмою
Інжиніринг зварювання та споріднених проце-
сів

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)



Керівник

Бреус Максим Сергійович

(прізвище та ініціали)

Ярос Юрій Олександрович

(прізвище та ініціали)



Рецензент

Матвієнко Максим Валентинович

(прізвище та ініціали)

Миколаїв-Херсон - 2024 р.

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут

Факультет _____ суднобудівний _____

Кафедра _____ зварювання _____

Освітній рівень _____ магістр _____

Спеціальність _____ 132 Матеріалознавство _____

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма Інжиніринг зварювання та споріднених процесів
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ



Гарант освітньої програми
к.т.н., доц. Матвієнко М.В.

“ _____ ” _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ

Бреус Максим Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Дослідження напружено-деформованого стану мідно-графітових вузлів при різних режимах охолодження

керівник проекту Ярос Юрій Олександрович, доцент, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені розпорядженням ХННІ НУК від 16.10.2024 року №10

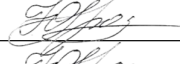
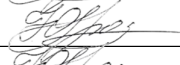
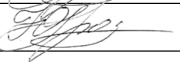
2. Строк подання студентом проекту 14.12 2024 р.

3. Вихідні дані до проекту Матеріал: Мідь М1, Графіт ГМЗ товщина 7.5 мм. висота 24мм; графітно-мідна втулка

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз проблеми паяння металів з неметалами. 2. Вибір комп'ютерного методу моделювання деформованого стану 3. Моделювання та дослідження напружено-деформованого стану

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Мета й задачі роботи; Обладнання для проведення експериментальних досліджень; Планування експерименту, обробка експериментальних даних; Методика проведення експерименту; Визначення геометричних параметрів зварних швів; Математична модель; Результати моделювання

6. Консультанти розділів проекту

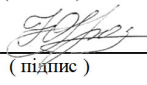
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	к.т.н., Ярослав Ю.О.		
2	к.т.н., Ярослав Ю.О.		
3	к.т.н., Ярослав Ю.О.		

7. Дата видачі завдання 16.10.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Дослідження питань паяння металевих матеріалів з неметалевими	28.10.2024р.	
2	Вибір комп'ютерного методу моделювання деформованого стану	04.11.2024р.	
3	Моделювання та дослідження напружено-деформованого стану	11.11.2024р.	
4	Графічна частина	04.12.2024р.	
5	Оформлення пояснювальної записки	05.12.2024р.	

Студент  Бреус М.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)  Ярослав Ю.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТАНЬ ПАЯННЯ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ З НЕМЕТАЛЕВИМИ	9
1.1 МЕТОДИ ПАЯННЯ МАТЕРІАЛІВ РІЗНОГО ТИПУ.	14
1.2 ПАЯННЯ ГРАФІТУ З МІДДЮ	16
ВИСНОВКИ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОБОТИ	17
2. ВИБІР КОМП'ЮТЕРНОГО МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ	19
2.1. ОСНОВИ МЕТОДУ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	19
2.2. СУЧАСНІ ПРОГРАМНІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ	22
2.3. ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ANSYS	31
2.4 ІСТОРІЯ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ	32
ВИСНОВКИ.....	34
3. МОДЕЛЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ	38
3.1 ВАРІАНТИ ДОСЛІДЖЕНИХ МОДЕЛЕЙ.....	38
3.2 РАДІАЛЬНІ НАПРУЖЕННЯ ПРИ ПАЯННІ МІДІ З ГРАФІТОМ	42
3.3 ОСЬОВІ НАПРУЖЕННЯ.....	44
3.4 ТАНГЕНЦІАЛЬНІ НАПРУЖЕННЯ	46
3.5 ЕКВІВАЛЕНТНІ НАПРУЖЕННЯ.....	47
3.6 ЕПЮРИ РАДІАЛЬНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ТОЧОК НА ЗОВНІШНІЙ ПОВЕРХНІ.....	52
3.7 ЕПЮРИ РАДІАЛЬНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ТОЧОК НА ВНУТРІШНІЙ ПОВЕРХНІ	54
3.8 ЕПЮРИ ОСЬОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ТОЧОК НА ЗОВНІШНІЙ ПОВЕРХНІ.....	56

3.9 ЕПЮРИ ОСЬОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ТОЧОК НА ВНУТРІШНІЙ ПОВЕРХНІ.....	58
ВИСНОВКИ.....	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	63
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	65

					MP 8.132.6121м.02.01.05. ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Розвиток сучасного машинобудування та інших промислових галузей, що використовують агрегати для роботи в екстремальних умовах, вимагає використання новітніх матеріалів і технологій для забезпечення високої надійності, довговічності та ефективності цих агрегатів. Ось кілька ключових напрямків, які характеризують розвиток цих галузей:

1. Нові конструкційні матеріали: Для виготовлення обладнання, яке працює в умовах високих температур, корозії, механічних навантажень та інших екстремальних умов, необхідні матеріали з високими технічними властивостями. Сюди відносяться:

- Композити: Матеріали, що складаються з двох або більше компонентів, які зберігають свої властивості у поєднанні. Наприклад, вуглецеві волокна в поєднанні з пластиками дозволяють створювати легкі, але міцні конструкції.

- Титанові сплави: Вони мають високу корозійну стійкість, високу міцність і здатні витримувати екстремальні температури. Це робить їх популярними для авіаційної та космічної промисловості, а також для компонентів, які піддаються високим навантаженням.

- Нікелеві сплави. Завдяки своїй стійкості до корозії та високих температур, нікелеві сплави широко використовуються у виробництві двигунів і турбін.

- Кераміка та керамічні композити: Вони мають високу твердість, стійкість до зношування та високу температуру плавлення, що робить їх необхідними для деталей важкої техніки та обладнання, що працює при високих температурах.

2. Інноваційні з'єднання: У таких агрегаціях важливими є способи з'єднання матеріалів, які забезпечують високу міцність та стійкість з'єднань, зокрема:

- Зварювання та пайка: Використовуються для з'єднання різних металів і сплавів, забезпечуючи високу міцність і герметичність.

					MP 8.132.6121м.02.01.05. ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Клепання та механічні з'єднання: Вони використовуються, коли зварювання або пайка не є оптимальними через складність або фізичні властивості матеріалів.

- Адгезивні з'єднання: Використання клеїв та інших адгезивних матеріалів дозволяє забезпечити високу міцність і стійкість з'єднань, особливо в умовах вібрацій та високих навантажень.

3. Складні технології обробки та виробництва:

- 3D-друк: Використання адитивних технологій для створення складних компонентів, які важко або неможливо виготовити традиційними методами.

- Мікро- і нанообробка: Для створення точних деталей, що працюють в умовах великих навантажень або в агресивних середовищах, застосовуються високоточні методи обробки.

4. Управління матеріалами: Підвищення ефективності роботи агрегатів у екстремальних умовах неможливе без ефективного моніторингу та контролю за станом матеріалів, що використовуються. Це включає в себе використання сенсорів для виявлення механічних напружень, температури, корозії та інших критичних параметрів.

Загалом, розробка і впровадження нових матеріалів і з'єднань дозволяє значно покращити функціональність та довговічність агрегатів і машин, що працюють в умовах екстремальних навантажень і середовищ, таких як високі температури, вібрації, корозія або високий рівень механічного зносу.

					МР 132.6121м.02.03.01. ПЗ									
Змін.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дата										
Студент	Бреус М.С.				1. Дослідження питань па- яння металевих матеріалів з неметалевими				Літ.		Арк.	Аркушів		
Консультант												8		
Керівник	Ярос Ю.О..								ХННІ НУК					
Н. Контр.														
Зав.кафедр.	Матвієнко М.В.													

1. Дослідження питань паяння металевих матеріалів з неметалевими

Паяння металевих матеріалів з неметалевими є важливим аспектом у різних галузях промисловості, оскільки дозволяє створювати надійні з'єднання між матеріалами, що мають різні фізичні та хімічні властивості. Це може бути особливо важливо в таких сферах, як електроніка, авіація, автомобілебудування, енергетика та багато інших, де необхідно поєднувати металеві частини з полімерними, керамічними, скляними чи іншими неметалевими матеріалами.

Основні аспекти паяння металевих і неметалевих матеріалів

Особливості матеріалів:

- Метали: Вони мають високу теплопровідність, механічну міцність і добре проводять електричний струм. При паянні металів використовуються спеціальні припої, які мають температуру плавлення нижче за температуру плавлення основного металу.
- Неметалеві матеріали: Вони можуть мати різні характеристики, такі як низька теплопровідність (наприклад, пластмаси, скло, кераміка), висока температурна стійкість або хімічна інертність (наприклад, кераміка чи полімери). З'єднання з неметалевими матеріалами вимагає ретельного вибору припоїв і режимів паяння.

Типи паяння:

- Паяння з використанням припою: При пайці металів з неметалами зазвичай використовуються спеціальні припої, які містять компоненти, що можуть забезпечити зчеплення з обома матеріалами. Це можуть бути легкоплавкі припої (наприклад, на основі олова чи срібла), а також спеціальні припої для складних матеріалів.
- Адгезивне паяння: Це метод, при якому замість традиційного припою використовуються спеціальні адгезиви або клеї, що створюють зв'язок між металом і неметалевим матеріалом.

Вибір припою:

					MP 8.132. 6121м.02.03.01. ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Припої для паяння металів з неметалами повинні мати гарну адгезію як до металу, так і до неметалевого матеріалу, а також повинні мати температуру плавлення, яка дозволяє уникнути пошкодження неметалевих частин. Наприклад, для паяння з пластмасами або склом використовуються припої з низькою температурою плавлення.

- Флюси для паяння також мають бути ретельно підібрані, оскільки вони повинні забезпечити зменшення поверхневого натягу та створення належного зв'язку між металом і неметалом.

Технічні проблеми:

- Механічна сумісність: Одним із основних викликів паяння металів з неметалами є різниця в їхніх механічних властивостях. Метал може мати високу жорсткість і міцність, а неметал — низьку. Це може призводити до розвитку тріщин або інших дефектів у з'єднанні при зміні температури або механічних навантаженнях.

- Теплове розширення: Матеріали з різними коефіцієнтами теплового розширення можуть спричиняти виникнення напружень у з'єднанні, що в свою чергу може привести до деформацій або руйнувань паяного з'єднання.

- Хімічна сумісність: Деякі неметалеві матеріали можуть вступати в хімічну реакцію з металами або припоями під час паяння, що може знизити якість з'єднання або призвести до утворення небажаних фаз.

Процеси паяння металів з неметалами:

- Паяння при високих температурах: Для деяких матеріалів, таких як кераміка, може знадобитися використання високих температур для утворення з'єднання. Проте висока температура може бути згубною для деяких неметалів (наприклад, пластмас), тому для них використовують методи паяння при нижчих температурах.

- Лазерне паяння: Лазерне паяння дозволяє локально нагрівати точку з'єднання без перегріву навколишніх ділянок, що є корисним для паяння складних матеріалів, таких як пластмаси або скло.

					MP 8.132. 6121м.02.03.01. ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

○ Ультразвукове паяння: Ультразвукові коливання можуть бути використані для з'єднання металевих і неметалевих матеріалів, таких як пластмаси, без потреби в додатковому флюсі або високих температурах.

Застосування паяння металів з неметалами:

○ Електроніка: У виробництві електронних компонентів часто використовують паяння металевих проводів з неметалевими матеріалами, такими як кераміка або полімери.

○ Автомобілебудування: Паяння металевих деталей з пластиковими або композитними частинами (наприклад, корпусами або елементами систем охолодження) є важливою частиною виробничих процесів.

○ Авіація та космонавтика: Використання паяння для з'єднання металів з високотемпературними матеріалами, такими як кераміка або спеціальні полімери, що використовуються в двигунах або інших елементах конструкції.

Виклики та рішення:

- Управління термічним режимом: Через різницю в теплопровідності металів і неметалів важливо контролювати температурні режими, щоб уникнути термічного пошкодження неметалевих частин.

- Вибір відповідних флюсів і припоїв: Використання спеціальних флюсів та припоїв, які мають властивості, що забезпечують хорошу адгезію до обох матеріалів, є критично важливим для створення надійного паяного з'єднання.

Таким чином, дослідження паяння металевих матеріалів з неметалевими є важливим напрямком для розвитку нових технологій з'єднання, які дозволяють забезпечити високоякісні з'єднання у виробництві складних і високотехнологічних компонентів. (20)

У сучасній техніці графітні вироби часто використовуються в комбінації з різними металами. Це зумовлено не лише економічними факторами, а й необхідністю використання позитивних властивостей графіту. Графіт відрізняється високою електричною та теплопровідністю, що робить його ідеальним матеріалом для створення струмопідвідних і струмовідвідних елементів, електродів, нагрівачів, тиглів і човників для плавки металів,

					MP 8.132. 6121м.02.03.01. ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електродів для дугових печей, великих анодів ртутних випрямлячів, нагрівачів шахтних печей, теплообмінників для високих температур, тепловиділяючих елементів, ущільнюючих пристроїв та інших застосувань, де необхідне поєднання з металами.

Низька щільність графіту, висока теплопровідність, що наближається до теплопровідності металів, а також його термостійкість, що перевищує більшість керамічних матеріалів, визначили широке застосування графіту в різних галузях техніки. При температурах від 2000 до 2500 °С міцність графіту значно зростає, і при цих температурах він досягає найбільшої границі міцності серед відомих матеріалів. Графіт має шарувату структуру, що робить його чудовим самозмащувальним матеріалом, здатним до легкого оброблення і проявляє низьку хімічну активність щодо багатьох реагентів.

Паяння є одним із найбільш технологічно зручних і економічно ефективних способів з'єднання графітових матеріалів, оскільки цей метод забезпечує створення міцних, електропровідних та герметичних з'єднань. Для паяння графіту використовуються різні методи, такі як капілярне, контактнореакційне, дифузійне паяння та паяння-зварювання.

Графіт добре змочується з такими тугоплавкими металами, як титан, цирконій, кремній, гафній, ванадій, ніобій, вольфрам, молібден, а також з металами групи заліза, алюмінієм, кремнієм та бором.

Однак під час паяння металів з графітом виникають певні труднощі, які спричинені відмінністю фізико-механічних властивостей (теплопровідність, модуль пружності, різні термічні коефіцієнти лінійного розширення) матеріалів, що з'єднуються. Це може призводити до утворення залишкових напружень, які можуть перевищувати межу міцності графіту, що ускладнює процес паяння.

Залишкові напруження в пластичних матеріалах зазвичай призводять до зміни їх форми та розмірів, а в графіті, який є крихким матеріалом, можуть виникати тріщини і руйнування. Основним етапом паяння графіту з металами є

					MP 8.132. 6121м.02.03.01. ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

його просочування розплавленим припоєм. Той металевий каркас, що утворюється в процесі, визначає міцність з'єднання.

Таблиця 1.1 ТКЛР матеріалів що з'єднуються

Матеріал	Температурний діапазон застосування	10 ⁻⁶ /°F макс	10 ⁻⁵ /°C макс	10 ⁻⁶ /°F мінімум	10 ⁻⁵ /°C мінімум
Мідь	Від кімнатної до 212-750° F = 100-390° C.	9,8	-	1,8	-
Графіт	Від кімнатної до 212-750° F = 100-390° C.	1,5	1,3	0,3	0,2
Свинець	Від кімнатної до 212-750° F = 100-390° C.	16,3	14,4	2,9	2,6
Чавуни якісні	Від кімнатної до 212-750° F = 100-390° C.	10,4	6,6	1,9	1,2
Срібло	Від кімнатної до 212-750° F = 100-390° C.	10,4	6,6	1,9	1,2
Кераміка	Від кімнатної до 212-750° F = 100-390° C.	4	3,3	0,7	0,6

Основні труднощі при з'єднанні графітових матеріалів з металами виникають через значну різницю в їх теплофізичних і фізико-механічних властивостях, таких як теплопровідність, міцність, модуль пружності та коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР). Оскільки графіт є крихким і відносно слабким матеріалом, це може призвести до його руйнування в зоні з'єднання.

Для зменшення напружень у металографітових з'єднаннях вибирають метали з ТКЛР, подібним до графіту. У багатьох випадках для цього використовують титан, хоча його електричні та теплові характеристики значно відрізняються від характеристик графіту. Ідеальним варіантом для таких з'єднань є мідь, але її ТКЛР набагато вищий, ніж у графіту, що часто призводить до утворення тріщин у графітовій частині після охолодження з'єднання.

Знизити рівень внутрішніх напружень у з'єднанні можна за допомогою таких підходів:

- зниження температури паяння;
- вибір матеріалів, що мають ТКЛР, близький до ТКЛР графіту в діапазоні температури нагрівання;
- використання пластичних припоїв або проміжних прошарків з молібдену, вольфраму, титану, цирконію чи сплаву 29НК, які мають границю пружності, що відповідає або наближається до границі міцності графіту при розтягуванні;
- вибір конструкції з'єднання, за якої на графіт впливають лише стиснувальні напруження;
- створення нерівномірного температурного поля, при якому металеві деталі нагріваються до нижчої температури, ніж графіт.

Паяння є найбільш ефективним і економічним методом з'єднання графітових матеріалів, оскільки забезпечує створення міцних, електропровідних і герметичних з'єднань. Для цього можуть застосовуватись різні методи паяння, такі як капілярне, контактнореакційне, дифузійне паяння та паяння-зварювання.

1.1 Методи паяння матеріалів різного типу.

На сьогодні паяння є одним з найбільш поширених методів з'єднання деталей. Цей процес активно використовується для з'єднання матеріалів, які важко зварюються плавленням, і які призначені для роботи при високих температурах і значних навантаженнях.

Контактно-реактивне паяння — це метод, при якому припій утворюється під час нагрівання до температури паяння завдяки контактному плавленню матеріалів або їх покриттів. Контактне плавлення відбувається між металами, які утворюють евтектики або тверді розчини, що плавляться при температурі, нижчій за температуру плавлення самих металів. Утворення рідини в процесі нагрівання відбувається через прагнення системи до зменшення вільної енергії. Це явище можна розглядати як окремий випадок утворення проміжних фаз під час дифузії металів у твердому стані, згідно з діаграмою стану сплавів.

					MP 8.132. 6121м.02.03.01. ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Контактне плавлення включає кілька етапів:

- 1) підготовчий етап, на якому по межі контакту утворюються тверді розчини або евтектичні фази;
- 2) стадію утворення зародків розплавлення та їх подальше зростання;
- 3) наступне плавлення твердих фаз, які контактують, в рідині, що утворюється в процесі.

Контактно-реактивне паяння дозволяє з'єднувати графіт з міддю, оскільки між цими матеріалами є перетин їх фазових діаграм, що дозволяє утворювати рівновагу з розплавом при мінімальній температурі плавлення.

Дифузійне паяння відрізняється від багатьох інших методів зварювання високою гігієнічністю, відсутністю ультрафіолетового випромінювання, шкідливих газів і пилу. Витрати енергії при цьому процесі в 4-6 разів менші, ніж при контактному зварюванні тих самих матеріалів, а ресурс їх роботи значно більший. У судновому машинобудуванні дифузійне паяння використовують для виготовлення елементів катодного захисту (наприклад, з нерозчинними платиново-титановими анодами) для захисту корпусу судна і гребних гвинтів від корозії та корозійно-механічних пошкоджень, а також для виготовлення деталей з жароміцних сплавів, арматури тощо.

У партії деталей, виготовлених за допомогою дифузійного паяння, зазвичай спостерігається стабільність якості з'єднань. Це забезпечується постійністю таких параметрів процесу, як температура, тиск, час паяння, ступінь розрідження та підготовка поверхонь. Завдяки високій стабільності механічних характеристик зварних з'єднань, можна застосовувати вибірковий контроль виробів і активне регулювання параметрів паяння. Це особливо важливо в тих випадках, коли не існує простих, дешевих і надійних методів контролю якості паяних з'єднань.

Типові конструкції паяних з'єднань графіту з металами можна побачити на рисунку 1.1 [13].

					MP 8.132. 6121м.02.03.01. ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

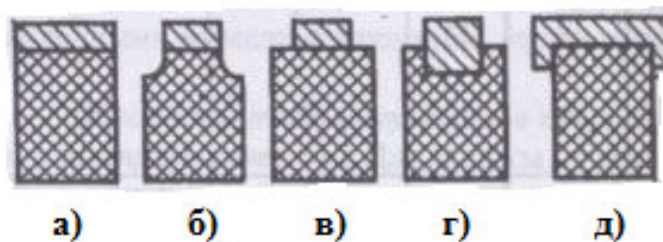


Рисунок. 1.1 Типи конструкцій паяних з'єднань графіту з металами:

а, б, в - стикові; г - стикове із заглибленням; д – охоплюючі

1.2 Паяння графіту з міддю

Труднощі при паянні графіту з міддю зумовлені практично відсутньою хімічною взаємодією між цими матеріалами, а також значною різницею в їх фізико-механічних властивостях.

Таблиця 1.2 Склади припоїв, режими паяння і властивості паяних з'єднань графіту з міддю.[8]

З'єднувані матеріали	Склад припою(масові частки)%, або спосіб паяння.	Режим паяння			σ, кПа
		Темпе- ратура °С	Час, хв.	Середовище	
Мідний дріт з графітовим блоком або графітизованою тканиною	70 Cu + 30 Ti	1000	10	Вакуум 66,65 мПа	—
Графіт ГМЗ + мідь М1	45 Cu +45 Ag + 10 Ti	900	—	Аргон	82
Графіт ВПП + мідь М1	Цирконій	900	—		65
	Контактно-реактивна	950			48
		1000			75
	45 Cu +45 Ag + 10 Ti	850	—		92
		900	—		95
		950	—		83
	Титан	900	—		32
	Контактно-реактивна	950	—		60
		1000	—		68
Мідний електролітичний графіт + мідь М1	ПСр 45 + 10 Ti	900	10	Аргон, сжимаючий тиск 0,5 мПа	—

Процес паяння цих матеріалів здійснюється шляхом використання проміжних прошарків і припоїв, що містять метали, які мають поверхнево-активні властивості щодо вуглецю (такі як титан, цирконій, нікель, корозійно-стійка сталь). Склади припоїв, режими паяння та властивості паяних з'єднань між графітом і міді наведені в таблиці 1.2.

Висновки, мета та завдання роботи

При паянні різнорідних матеріалів, таких як мідь і графіт, утворюються залишкові напруження, викликані різницею в їх температурних коефіцієнтах лінійного розширення (ТКЛР). Це може призвести до утворення тріщин та руйнування з'єднання.

Метою роботи є дослідження, за допомогою комп'ютерного моделювання, особливостей формування напружено-деформованого стану (НДС) при охолодженні після дифузійного зварювання і паяння металографітових з'єднань, а також впливу способу охолодження на цей процес.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі завдання:

- дослідити кілька варіантів зниження температури;
- вибрати програму для дослідження напружено-деформованого стану;
- проаналізувати напружено-деформований стан з'єднання після паяння для кожного варіанту;
- визначити оптимальний варіант охолодження та дослідити вплив повзучості міді на напружено-деформований стан;
- провести аналіз отриманих результатів і розробити рекомендації щодо способу охолодження з'єднання.

					MP 8.132. 6121м.02.03.01. ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					МР 132.6121м.02.03.02. ПЗ								
Змін.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дата									
Студент	Бреус М.С.				2. Вибір комп'ютерного методу моделювання деформованого стану				Літ.		Арк.	Аркушів	
Консультант											18		
Керівник	Ярос Ю.О..								ХННІ НУК				
Н. Контр.													
Зав.кафедр.	Матвієнко М.В.												

2. Вибір комп'ютерного методу моделювання деформованого стану

2.1. Основи методу скінчених елементів

Один із найефективніших сучасних методів чисельного вирішення інженерних задач за допомогою ЕОМ — це метод скінчених елементів (МСЕ). Ідея представлення суцільного середовища як системи елементів скінчених розмірів була запропонована ще на початку XIX століття Пуассоном. Розвиток МСЕ здійснювався в двох основних напрямках: з одного боку, як різновид варіаційно-різницевого методу для вирішення задач математичної фізики, а з іншого — як метод, заснований на принципах будівельної механіки стрижневих систем, зокрема на методі переміщень. Початок цих напрямів було покладено в роботах Р. Куранта, Мак Генрі та А. Хреннікова в 40-х роках XX століття. Згодом ці напрямки почали об'єднуватися. Однією з перших значних робіт, присвячених МСЕ, стала праця М. Дж. Тернера, Р.В. Клафа, Г.С. Мартіна та Л. Дж. Топпа, опублікована в 1956 році. Термін «скінчений елемент» вперше було введено в роботу Р.В. Клафа в 1960 році. Швидкий розвиток методу був безпосередньо пов'язаний із появою високопродуктивних обчислювальних машин і розв'язанням задач в аерокосмічній техніці.

Наразі кількість публікацій, присвячених МСЕ, налічує тисячі найменувань. Основи методу та його застосування до задач теорії пружності й пластичності, теорії пластин і оболонок, гідро- та аеродинаміки, теплопровідності, розрахунку стрижневих систем, мембранних конструкцій і багатьох інших тем описані в підручниках, навчальних посібниках і монографіях таких авторів, як О. Зенкевич, Дж. Оден, Г. Стренг, Д. Фікс, Л. Сегерлінд, Р. Галлагер, К. Бате, Е. Вілсон, Д. Норрі, Ж. де Фріз, В.А. Постнов, І.Я. Хархурім, Л.А. Розін, А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лашеников, Н.Н. Шапошников, Р.А. Хечумов, Х. Кепплер, В.І. Прокоп'єв, С.Б. Синицин, В.П. Агапов, А.Е. Белкін, С.С. Гаврюшин, А.Б. Золотов та П.О. Акімова.

Основна концепція методу полягає в представленні розрахункових конструкцій як сукупності простих елементів, з'єднаних у певних точках.

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Суцільне середовище з нескінченним числом ступенів свободи замінюється системою підобластей, кожна з яких має обмежену кількість ступенів свободи. В рамках цього підходу, шукані величини (наприклад, переміщення, напруження, деформації тощо) всередині кожного кінцевого елемента виражаються через апроксимуючі функції, що залежать від значень цих величин у вузлових точках. Розподілені навантаження замінюються еквівалентними силами, прикладеними до вузлів. Математично завдання полягає у перетворенні диференціальних рівнянь або енергетичних функціоналів, що описують конструкцію, у систему алгебраїчних рівнянь, розв'язок якої дає значення шуканих вузлових невідомих.

Метод скінчених елементів (МСЕ) має широке застосування в розрахунках на міцність, стійкість і коливання різноманітних конструкцій, таких як будівельні, машинобудівні та авіаційні. З його допомогою можна ефективно аналізувати стрижневі системи (ферми, рами тощо), тонкостінні просторові конструкції (наприклад, плити перекриттів, оболонки покриттів тощо), масивні тривимірні тіла, а також комбіновані системи, що складаються з елементів різних вимірностей (одновимірних, двовимірних та тривимірних).

МСЕ характеризується широкою сферою застосування, незалежністю від геометрії конструкції та фізичних властивостей матеріалів, відносною легкістю у врахуванні впливів навколишнього середовища (механічних, температурних, корозійних та інших), а також високим рівнем автоматизації всіх етапів розрахунку. Метод має зрозумілу фізичну інтерпретацію та тісно пов'язаний з методом переміщень, який широко використовується в будівельній механіці.

На основі методу кінцевих елементів створено багато потужних програмних комплексів. Серед них можна виділити такі, як ABAQUS, ADINA, ANSYS, COSMOS/M, MSC/NASTRAN, LIPA, SCAD, STARK, Стадії. Більшість з цих програм мають розвинену бібліотеку кінцевих елементів і дозволяють виконувати розрахунки на міцність, стійкість та коливання, враховувати фізичну і геометричну нелінійність, ортотропію матеріалу, температурні навантаження та інші фактори. Наведений список програм, що реалізують

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

метод скінчених елементів, не є вичерпним і відображає лише поточний стан справ у цій сфері.

Метод скінчених елементів безумовно має значні переваги в порівнянні з іншими підходами і є досить універсальним. Однак, як зазначає Р. Галлагер у своїй монографії, «цей метод навряд чи є остаточним словом у чисельному аналізі в його поточному вигляді. Його слід розглядати як одну з багатьох ступенів розвитку засобів чисельного дослідження при проектуванні».

Найбільше поширення в практиці розрахунку та проектування будівельних конструкцій отримав варіант МСЕ, заснований на переміщеннях, коли шуканими величинами є переміщення розраховуваної системи. При використанні методу кінцевих елементів застосовуються основні поняття та методи лінійної алгебри.

Метод скінчених елементів включає кілька основних етапів:

1. Ідеалізація області. Конструкція, що розраховується, розбивається на кінцеві елементи за допомогою уявних точок, ліній або поверхонь. Елементи з'єднуються в вузлових точках, які розташовані на їхніх межах. У деяких задачах будівельної механіки в якості шуканих величин, окрім вузлових переміщень, також використовуються їх похідні.

2. Побудова інтерпольованих функцій. Для визначення переміщень всередині кожного кінцевого елемента через значення переміщень у вузлових точках обирається система інтерполяційних функцій (зазвичай кусочно-поліноміальних). Ці функції підбираються так, щоб забезпечити безперервність шуканих величин (наприклад, переміщень і їх похідних) на кордонах елементів.

3. Виведення геометричних і фізичних співвідношень. На основі інтерпольованих функцій розробляються залежності між деформаціями та переміщеннями (геометричні співвідношення) і між напруженнями та деформаціями (фізичні співвідношення).

4. Побудова матриці жорсткості кінцевого елемента. За допомогою принципу Лагранжа, спираючись на отримані геометричні та фізичні

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

співвідношення, будується матриця жорсткості для кожного кінцевого елемента.

5. Отримання системи рівнянь методу скінчених елементів. Кожна матриця жорсткості окремого елемента включається в глобальну матрицю жорсткості через цикл елементів. Це дозволяє сформувати систему алгебраїчних рівнянь для всієї конструкції (рівняння рівноваги) у вигляді $Rz = P$, де R — матриця жорсткості всієї системи, z — вектор невідомих вузлових переміщень, а P — вектор вузлових навантажень. Важливо врахувати граничні умови, оскільки без них система рівнянь буде виродженою.

6. Розв'язання системи алгебраїчних рівнянь. Для вирішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) застосовуються як точні, так і ітераційні методи, особливо коли система має високий порядок. Чисельні процедури, що ґрунтуються на цих методах, враховують симетричну і стрічкову структуру матриці жорсткості системи.

7. Визначення деформацій і напружень. Деформації, напруження та зусилля в конструкції обчислюються за допомогою вузлових переміщень, отриманих після розв'язання, з використанням геометричних і фізичних співвідношень.

2.2. Сучасні програмні комплекси для моделювання напруженого стану

NX Nastran — це програмне забезпечення для комп'ютерного інженерного аналізу (CAE) від компанії Siemens PLM Software, яке використовує метод кінцевих елементів (МСЕ) для моделювання проєктованих виробів. NX Nastran призначений для вирішення як статичних, так і динамічних лінійних і нелінійних інженерних задач, включаючи аналіз деформацій, напружень, вібрацій та інших характеристик.

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У 1964 році НАСА (Національне агентство з аеронавтики і дослідженню космічного простору США) поставило задачу розробки програмного пакета для кінцево-елементного аналізу виробів, зокрема для проектування ракети-носія "Сатурн V". Перша комерційна версія програмного забезпечення NASTRAN була випущена в 1972 році. Однією з компаній, що брала участь у розробці, була MSC (MacNeal-Schwendler Corporation). У 2003 році компанія UGS придбала вихідний код програми у MSC.Software, а пізніше розвивала його під назвою NX Nastran.

NX Nastran дозволяє виконувати повний спектр інженерних розрахунків, включаючи аналіз напружено-деформованого стану, визначення власних частот і форм коливань, аналіз стійкості, розв'язування задач теплопередачі, а також нелінійні статичні та динамічні задачі, дослідження частотних характеристик і відгуку на динамічні та випадкові навантаження.

Цей вирішувач доступний як частина інженерних систем для підготовки розрахункових моделей NX і Femap, або у вигляді самостійного програмного продукту, який може працювати на спеціально виділених CAE серверах або обчислювальних кластерах з сумісними інструментами для пре-/постпроцесингу.

NX Nastran широко застосовується в таких галузях, як аерокосмічна, автомобільна, суднобудівна, важка промисловість, медицина та виробництво споживчих товарів для аналізу напружень, вібрацій, довговічності, теплопередачі та акустичних характеристик. Система також забезпечує високу інтеграцію з іншими CAE-додатками.

Для спрощення інтеграції можливостей NX Nastran в індивідуальні програми клієнтів, розробники можуть використовувати пакет засобів розробки NX Nastran SDK.

У грудні 2008 року Siemens PLM Software повідомила, що за допомогою NX Nastran фахівцям вдалося розв'язати складну статичну лінійну задачу для крила літака, яке піддавалося згинальним навантаженням. Для цього була створена масштабна кінцево-елементна модель з понад 98 млн оболонкових і

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

49 млн просторових елементів, що включала близько 500 млн рівнянь. Рішення цієї задачі зайняло менше 18 годин на сервері IBM Power 570 з 8 ядрами.

LS-DYNA — це багатофункціональна програма, яка використовує явне формулювання методу кінцевих елементів (МКЕ) і призначена для аналізу нелінійного динамічного відгуку тривимірних пружних конструкцій. Спочатку розроблена в рамках оборонної програми США, LS-DYNA і сьогодні зберігає своє стратегічне значення в цій галузі.

Програма має повністю розпаралелений і векторизований високоефективний алгоритм для вирішення нелінійних і швидкоплинних процесів, автоматизовану обробку контактних задач та численні функції для перевірки отриманих результатів. Це дозволяє інженерам по всьому світу ефективно вирішувати складні задачі, такі як удари, руйнування і формування.

Унікальний математичний апарат LS-DYNA включає понад 25 алгоритмів для контактної взаємодії та більше 100 рівнянь стану, що дає змогу розв'язувати різноманітні задачі, серед яких: нелінійна динаміка, теплові процеси, руйнування, розвиток тріщин, контактні задачі, квазістатичні процеси, Ейлерова формулювання МКЕ, акустика в реальному часі та багатодисциплінарний аналіз (міцність, теплофізика, акустика).

Завдяки таким можливостям LS-DYNA широко застосовується для моделювання реальних задач у багатьох сферах. Ось кілька прикладів можливостей програми:

1. Оцінка опору до удару (краш-тести) для автомобілів, літальних апаратів, поїздів, суден.
2. Аналіз динамічної міцності автомобільних компонентів: кузовів, бамперів, колісних дисків, рульових колонок тощо при русі по нерівних поверхнях.
3. Оцінка безпеки пасажирів: взаємодія повітряних подушок і віртуальних моделей людини, моделювання ременів безпеки, прорив подушки безпеки тощо.

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Процеси формування металів, скла, пластиків: прокат, видавлювання, штампування, волочіння, надпластичне формування, різка, лиття, глибока витяжка, гідроформування та багатоступінчасті процеси.

5. Оцінка птахостійкості та задачі про відрив лопатки турбінних двигунів.

6. Взаємодія потоків рідини і газу з конструкціями.

7. Оцінка вибухових навантажень на вироби.

8. Задача проникнення (пробивання броньової пластини, впровадження пенетратора в ґрунт тощо).

9. Розрахунок зварних, клепаних і болтових з'єднань.

10. Біомедичні програми.

11. Моделювання землетрусів.

ADAMS (Mechanical Dynamics, Inc.)

На сьогодні ADAMS широко використовується в таких галузях, як автомобілебудування, авіація, космонавтика, залізничний транспорт, загальне машинобудування, суднобудування, робототехніка, приладобудування, біомеханіка, а також у сфері розваг та відпочинку.

ADAMS пропонує користувачам наступні можливості:

1. Створення комп'ютерних моделей систем із твердих і деформівних елементів, з'єднаних між собою різними зв'язками та шарнірами.

2. Розробка параметричних моделей на основі твердотілого моделювання за допомогою ядра Parasolid, а також обмін геометричними моделями у форматах IGES, STEP, DXF, DWG, STL.

3. Візуалізація моделей конструкцій за допомогою потужних графічних засобів.

4. Визначення вимушених переміщень і рухів елементів системи, а також прикладання зовнішніх сил і моментів.

5. Проведення статичного, динамічного та кінематичного аналізу систем.

6. Візуалізація руху системи та фіксація заданих подій.

7. Аналіз впливу зміни параметрів конструктивних елементів на поведінку системи (аналіз чутливості).

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. Оптимізація виробів за заданими критеріями.

9. Представлення результатів аналізу у зручних для інтерпретації формах: графіки, таблиці, анімації (включаючи високоякісні анімації, спеціалізовані: з «точки зору водія», обліт рухомого об'єкта по заданій траєкторії, «що стежить камера» тощо).

10. Двосторонній обмін інформацією з програмними комплексами автоматизованого проектування, кінцево-елементного аналізу та анімації.

11. Налаштування комплексу для розв'язання типових задач конкретного користувача.

12. Використання спеціалізованих модулів для окремих технічних галузей (автомобільної, залізничної тощо).

13. Визначення всіх параметрів руху системи для абсолютно жорстких і пружних елементів, обчислення зусиль у зв'язках і реакцій в опорах із повною історією змін, зусиль, що діють на елементи управління, а також визначення взаємного переміщення частин системи, переміщень і кутів повороту в шарнірах, проведення статичного та модального аналізу та інших операцій.

Star-CD (Computational Dynamics)

Star-CD була першою у світі програмою, яка впровадила метод ковзних сіток. Завдяки ефективній паралелізації алгоритмів, заснованих на методі кінцевих обсягів, і унікальним методам автоматизованого розбиття області течії, програма дозволяє моделювати задачі різного рівня складності, навіть з найскладнішою геометрією.

Star-CD є універсальним CFD-пакетом, що надає користувачам можливість вирішувати задачі механіки рідин і газів, включаючи:

- Стаціонарні та нестаціонарні течії;
- Ламінарні течії для ньютонівських і неньютонівських рідин;
- Турбулентні течії з використанням кількох відомих моделей;
- Стискувані та нестискувані течії, включаючи близькозвукові та надзвукові;

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Теплоперенос (конвективний, радіаційний, теплопровідність з урахуванням твердих тіл);
 - Масоперенос;
 - Хімічні реакції;
 - Горіння газоподібного, рідкого та твердого палива;
 - Розподілене опір (наприклад, у пористих середовищах, теплообмінниках);
 - Багатокомпонентні потоки;
 - Багатофазні потоки за моделями Лагранжа (дисперсні гази, тверде тіло, газ-рідина, рідина-тверде тіло, рідина- рідина);
 - Багатофазні потоки за моделлю Ейлера;
 - Вільні поверхні.
- Серед інших можливостей програми:
- Графічний і командний ввід;
 - Спеціалізовані режими роботи для «новачків» і «експертів» з інтерактивними підказками;
 - Великий набір інструментів для створення сіток, включаючи автоматизоване згущення;
 - Імпорт геометричних моделей у форматах STL, IGES і VDAFS;
 - Інтерфейси з CAD/CAE програмами, такими як Ansys, HEXAR, ICEM, I-DEAS, Nastran, Patran, Hypermech і SAMM;
 - Різноманітні засоби візуалізації та обробки результатів (векторні, кольорові контурні заливки, ізоповерхні, перетини, трасування частинок, анімація);
 - Екстраполяція результатів на сітки і поверхні довільної форми;
 - Побудова графіків.

Для препроцесорної обробки Star-CD використовує метод SAMM (Semi Automatic Meshing Methodology), розроблений компанією Adapco, що надає такі можливості:

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Використання змішаних сіток з традиційних елементів (гексагональних, тетраедричних) та унікальних зрізаних призматичних елементів;
- Автоматичне «зшивання» полів параметрів на суміжних областях з різними розбиттями;
- Адаптивне згущення сітки на основі оцінки помилки розрахунку;
- Динамічне коригування сітки для задач зі змінними граничними умовами (наприклад, поршневі двигуни);
- Використання ковзних сіток для задач з тимчасовою залежністю, таких як лопатки турбін;
- Додаткові адаптивні процедури, включаючи динамічне додавання і видалення елементів;
- Множинні обертові системи координат для моделювання процесів у багатоступінчастих турбінних насосах, вентиляторах тощо;
- Облік циклічної симетрії та інших видів періодичності для зменшення розмірності задач у лопатевих і багатоступінчастих машинах.

Pro/Engineer

Pro/MESH, Pro/FEM-POST та Pro/SURFACE — це модулі для Pro/Engineer, які використовуються для розрахунків на міцність методом кінцевих елементів.

Pro/MESH надає можливість створювати сітки кінцевих елементів для моделей, розроблених у Pro/Engineer. Тонкостінні та твердотільні об'єкти можуть бути автоматично модульовані, розбиті та експортовані для подальшого аналізу в спеціалізованих програмах. Pro/MESH є додатковим модулем для Pro/Engineer.

Pro/FEM-POST забезпечує повний набір інструментів для постобробки результатів, отриманих методом кінцевих елементів. Цей модуль дозволяє відображати результати аналізу в середовищі Pro/Engineer, спрощуючи процес інтегрованого проектування та аналізу. Pro/FEM-POST полегшує перевірку правильності рішень на етапах проектування і оптимізації. Для роботи з цим

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

модулем необхідна наявність Pro/MESH, оскільки цей модуль забезпечує побудову сітки.

Pro/SURFACE розширює можливості Pro/Engineer, надаючи інструменти для розробки та вдосконалення складних геометричних поверхонь, зокрема поверхонь вільної форми. Всі поверхні, створені в Pro/SURFACE, повністю асоціативні, що дозволяє швидко оцінювати різні варіанти проектів. Цей модуль дозволяє розробляти моделі для таких галузей, як аерокосмічна промисловість та виробництво товарів народного споживання.

Pro/MESH забезпечує швидке і ефективне розбиття моделей, що дозволяє скоротити цикл "моделювання-тестування" і покращити якість виробів. Після створення сітки модель може бути передана в зовнішні програми для аналізу, таких як термонапружений стан, потік рідини, теплопередача, механізми утворення тріщин, втома, корозійне середовище. Pro/MESH автоматично генерує сітку відповідно до вимог конструктора, який може уточнити її в необхідних місцях. Це дозволяє швидко оцінити різні конфігурації моделей за різними умовами, забезпечуючи гнучкість у проектуванні і підвищення якості продукції.

Pro/MESH дає можливість конструктору:

- Швидко створювати сітки кінцевих елементів. Для цього спочатку задаються параметричні навантаження та граничні умови, після чого точність розбиття визначається глобальними та локальними розмірами елементів і властивостями матеріалів. Після цього Pro/MESH автоматично створює сітку і показує результати перегляду.

- Створювати різноманітні елементи, такі як оболонкові (трикутні та чотирикутні), об'ємні (тетраедричні), масивні елементи та бар-елементи (наприклад, бруси, пружини, балки).

- Визначати точне розташування оболонкових елементів для тонкостінних моделей, з автоматичним розміщенням на центральній поверхні або на поверхні, заданій користувачем.

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Визначати контактні умови для моделей у збірці. Pro/MESH дозволяє задавати параметри контактів між деталями та автоматично створює бар-елементи для моделювання цих контактів.

- Модифікувати навантаження, граничні умови і розміри елементів в процесі проектування, при цьому контролюючи розміри елементів через встановлені співвідношення.

- Експортувати дані про сітку для зовнішнього аналізу.

Усі етапи аналізу, від створення сітки до постобробки, можуть бути виконані в середовищі Pro/Engineer. Після створення моделі вона може бути передана в різні MCE програми, такі як PATRAN, ANSYS, NASTRAN, COSMOS/M, або в нейтральний формат FEM Neutral для подальшого аналізу в інших трансляторах. Крім того, користувачі можуть переглядати результати розрахунків в Pro/Engineer за допомогою Pro/FEM-POST.

ABAQUS/Standard — це потужна кінцево-елементна програма загального призначення, призначена для вирішення складних інженерних задач, що виконуються на виробництві. Завдяки широкому набору засобів моделювання вона здатна обробляти різноманітні прикладні задачі.

Програма розроблена для ефективної роботи як на персональних комп'ютерах з операційними системами Windows NT або UNIX, так і на потужних серверах або суперкомп'ютерах.

ABAQUS/Standard дозволяє проводити аналізи в тимчасовій та частотній областях з використанням різних методів. Ці методи поділяються на два основних типи: «узагальнені типи аналізу», які можуть бути як лінійними, так і нелінійними, і «лінеаризований аналіз», де лінійний відгук моделі розраховується на основі загального, але потенційно нелінійного, початкового стану. Одночасно можуть бути виконані різні типи аналізів.

Типи аналізів в ABAQUS/Standard можуть комбінуватися в будь-який фізично обґрунтований спосіб. Наприклад, один розрахунок може поєднувати нелінійний статичний аналіз і наступний нелінійний динамічний аналіз, де

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

результат статичного аналізу служить початковими умовами для динамічного відгуку.

Користувач розбиває історію навантаження на кроки, зважаючи на зручність. Для лінійного аналізу кожен крок розглядається як окреме навантаження, в той час як для нелінійного аналізу кожен крок є етапом загальної історії навантаження. Тип аналізу визначається всередині кожного кроку.

Лінійний аналіз може бути лінеаризований щодо нелінійного базового стану. Наприклад, деталь з гуми може бути деформована і попередньо напружена під час нелінійного статичного аналізу, після чого можуть бути проведені серії лінеаризованих розрахунків для визначення власних частот і малих вібрацій деталі на основі її жорсткості та геометрії у базовому стані.

У нелінійному аналізі початкові умови для кожного кроку задаються станом моделі на завершення попереднього кроку. Це дозволяє ефективно аналізувати складні історії навантаження, такі як технологічні процеси. Кожен крок поділяється на кілька збільшень, і в кожному збільшенні ABAQUS/Standard виконує ітерації для знаходження рівноважного стану, застосовуючи в більшості випадків повний метод Ньютона. Критерії збіжності визначаються автоматично, але користувач може коригувати ці параметри вручну.

Результати аналізу можуть бути передані між ABAQUS/Standard і ABAQUS/Explicit, що дозволяє використовувати обидва вирішувачі для моделювання різних етапів процесу. Наприклад, деталі можуть бути спочатку змодельовані в ABAQUS/Standard для статичного навантаження, після чого передаються в ABAQUS/Explicit для моделювання удару на вже навантажену збірку. Або ж моделювання штампування може бути виконано в ABAQUS/Explicit, а потім передано в ABAQUS/Standard для оцінки пружності після завершення процесу.

2.3. Програмний комплекс ANSYS

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ANSYS — це універсальна програмна система для скінчено-елементного аналізу (MCE), яка розвивається вже понад 30 років і здобула популярність серед фахівців у галузі комп'ютерного інжинірингу (CAE, Computer-Aided Engineering). Вона використовується для вирішення лінійних і нелінійних задач, стаціонарних і нестаціонарних, а також просторових задач у таких областях, як механіка деформування твердих тіл, механіка конструкцій (включаючи геометрично та фізично нелінійні задачі контактної взаємодії елементів конструкцій), механіка рідин і газів, теплообмін, електродинаміка, акустика і механіка взаємопов'язаних полів. Вона дозволяє моделювати та аналізувати процеси в різних галузях промисловості, що допомагає уникнути витратних і тривалих циклів розробки «проектування — виготовлення — випробування». Система працює на основі геометричного ядра Parasolid.

Розробником ANSYS є американська компанія ANSYS Inc., яка також створила інші програмні продукти для КЕ моделювання, такі як DesignSpace та AI Solutions (NASTRAN, ICEM CFD), які орієнтовані на специфічні галузі виробництва. ANSYS Inc. є стратегічним партнером багатьох компаній, допомагаючи їм впроваджувати необхідні зміни. Програмні засоби ANSYS сумісні з іншими пакетами та працюють на різних операційних системах. Вони також інтегруються з популярними CAD-системами, такими як Unigraphics, CATIA, Pro/ENGINEER, SolidEdge, SolidWorks, Autodesk Inventor та іншими.

ANSYS є однією з найвідоміших CAE-систем, що використовується на таких великих підприємствах, як ABB, BMW, Boeing, Caterpillar, Daimler-Chrysler, Exxon, FIAT, Ford, БелАЗ, General Electric, Lockheed Martin, MeyerWerft, Mitsubishi, Siemens, Shell, Volkswagen-Audi та багатьох інших провідних промислових компаніях.

2.4 Історія розробки програмної системи

Перша версія програми значно відрізнялася від її сучасних варіантів і була орієнтована лише на вирішення задач теплопередачі та міцності в лінійній

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

постановці. Як і інші програми того часу, вона працювала в пакетному режимі й була доступна тільки на суперкомп'ютерах.

У початку 70-х років XX століття система зазнала значних змін завдяки впровадженню нових обчислювальних технологій і врахуванню запитів користувачів. Була додана підтримка нелінійних задач різної природи, можливість використання методу підконструкцій, а також розширена бібліотека кінцевих елементів. Окрім того, компанія почала активно впроваджувати нові персональні комп'ютери та векторні графічні термінали, освоївши їх можливості через кілька років розробок.

Наприкінці 70-х років значною новацією стала поява інтерактивного режиму роботи, що значно полегшило процес створення кінцево-елементних моделей і оцінки результатів (пре- та пост-процесорна обробка). Стала можлива інтерактивна графіка для перевірки геометрії моделі, властивостей матеріалів та граничних умов перед початком розрахунку, а також виведення графічної інформації на екран для контролю результатів у режимі реального часу.

ANSYS є унікальною кінцево-елементною системою, яка охоплює широкий спектр явищ різних фізичних типів: міцність, теплофізику, гідрогазодинаміку, електромагнетизм та інші, із можливістю вирішення комплексних задач, що поєднують всі ці напрямки. Вона забезпечує інтеграцію та двосторонній обмін даними з усіма популярними CAD, CAE та CAM-системами. Програмна система є відкритою для модифікацій і доповнень, має оптимальне співвідношення «ефективність/вартість» і є першою серед кінцево-елементних програм, сертифікованою за міжнародними стандартами ISO 9000 та ISO 9001.

ANSYS надає потужну систему допомоги, яка містить велику за обсягом інформацію в гіпертекстовому форматі, доступну для користувачів у інтерактивному режимі онлайн. Препроцесор ANSYS дозволяє не тільки створювати власні геометричні моделі, а й імпортувати вже готові з інших CAD-систем. Після імпорту геометрична модель може бути модифікована, оскільки дані перетворюються в формат, сумісний з ANSYS, і деталь не

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

замінюється «жорсткою» кінцево-елементною сіткою. Користувач може редагувати модель, видаляти неважливі деталі, змінювати сітку тощо.

ANSYS дозволяє вирішувати завдання в таких областях, як міцність, теплофізика, гідрогазодинаміка та електромагнетизм, спільно з аналізом втомних характеристик і оптимізацією конструкцій. Єдина система команд і база даних усувають проблеми інтеграції та обміну даними між різними типами задач. Використання спеціалізованих кінцевих елементів дозволяє проводити унікальний пов'язаний аналіз, що дає змогу здійснювати оптимізацію конструкцій з урахуванням різних фізичних впливів на них.

Висновки

Скінчено-елементний метод (СЕМ) є одним з найбільш потужних та універсальних інструментів для вирішення складних інженерних задач. Завдяки своїй здатності моделювати поведінку різних матеріалів і конструкцій під впливом різноманітних навантажень, СЕМ знаходить застосування у таких сферах, як механіка, теплотехніка, гідрогазодинаміка, електромагнетизм та інші. За допомогою цього методу можна швидко отримати рішення навіть для складних нелінійних задач, що значно скорочує час, необхідний для проведення аналізів, порівняно з традиційними експериментальними методами.

Автоматизація процесу вирішення інженерних задач за допомогою програмних комплексів стала ключовим етапом у розвитку інженерної справи. Для того щоб максимально ефективно застосовувати СЕМ, програмний комплекс повинен надавати набір інструментів для трьох основних етапів процесу: препроцесінгу, розв'язку та постпроцесінгу. Препроцесінг включає в себе створення геометричних моделей, визначення граничних і початкових умов, а також розбиття геометрії на кінцеві елементи. Важливою складовою цього етапу є правильна та детальна підготовка моделі, оскільки на цьому етапі закладаються всі параметри, які впливатимуть на точність і коректність майбутніх результатів.

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

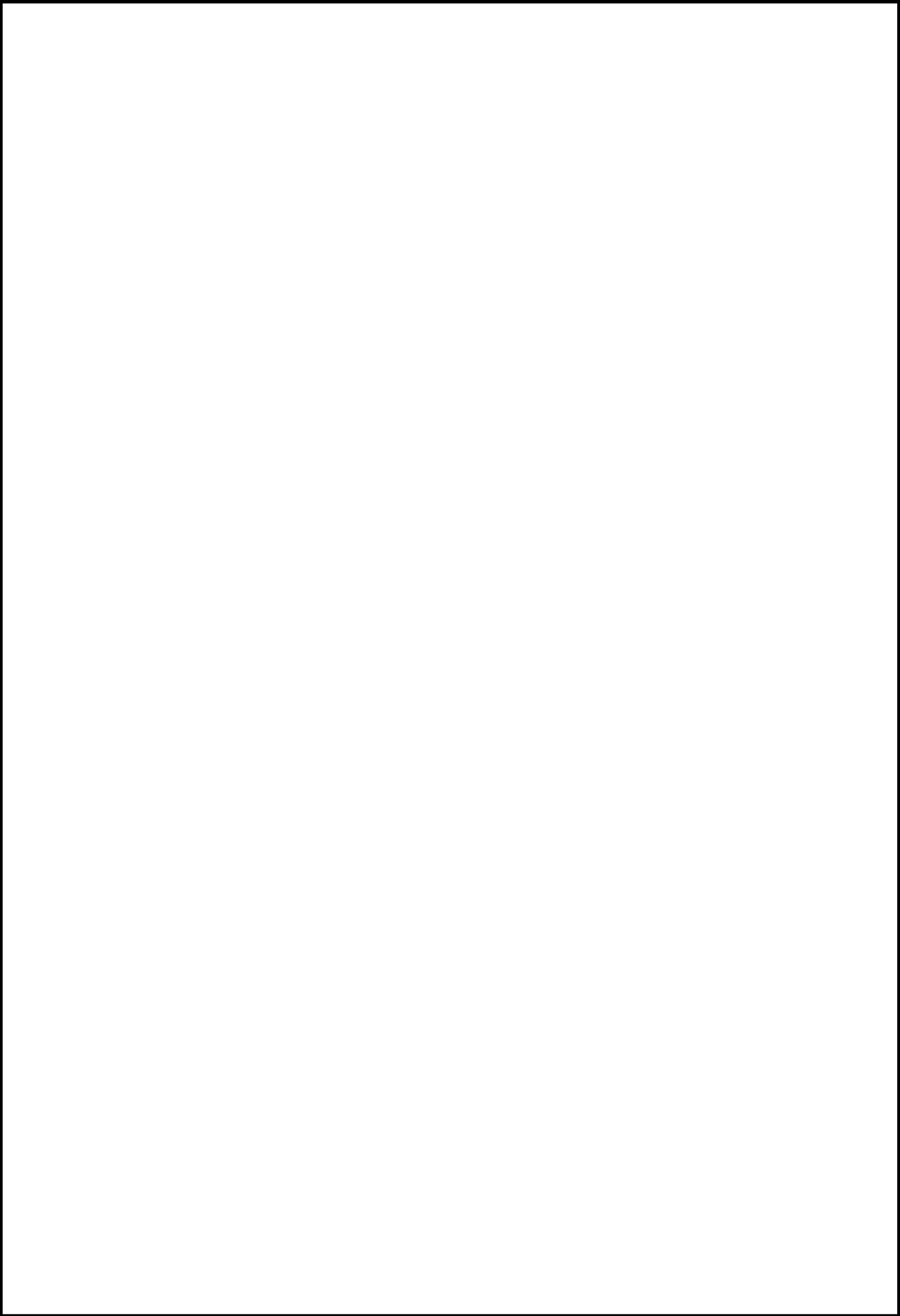
Основним етапом є безпосереднє рішення задачі, де відбувається розрахунок розподілу напружень, деформацій, температурних полів та інших параметрів у межах кінцево-елементної моделі. Останнім етапом є постпроцесинг, який полягає в обробці отриманих результатів, їх візуалізації та аналізі. Це дозволяє інженеру оцінити результати розрахунку, виявити можливі проблеми або області, що потребують додаткової уваги, а також використовувати ці дані для подальших розробок або оптимізації конструкцій.

Програмні комплекси, які використовуються для автоматизації вирішення задач за допомогою СЕМ, повинні бути високоефективними, зручними у використанні та забезпечувати інтеграцію з іншими програмними продуктами, наприклад, CAD/CAM-системами. Таким чином, комплекс, що включає функції для всіх етапів моделювання та аналізу, значно спрощує і пришвидшує процес інженерних розрахунків, дозволяючи ефективно вирішувати завдання за короткий час.

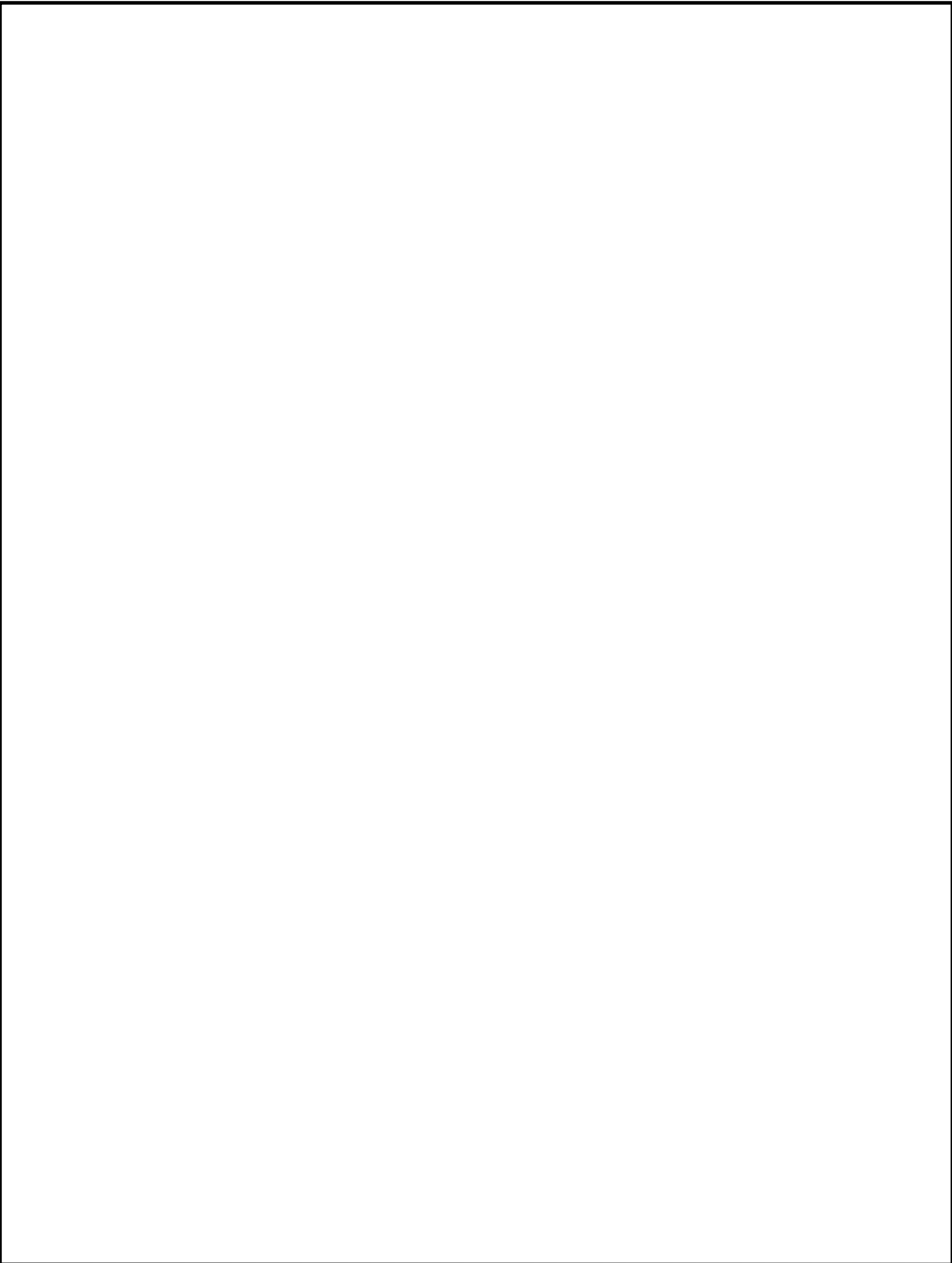
Програмний комплекс ANSYS є одним з лідерів серед таких систем і має широкі можливості для вирішення різноманітних інженерних задач. Всі етапи роботи з ним автоматизовані та взаємопов'язані, що дозволяє користувачу зручно і швидко створювати моделі, виконувати їх розрахунки та аналізувати результати. ANSYS підтримує широкий спектр задач — від простих лінійних розрахунків до складних нелінійних та багатофізичних аналізів. Завдяки розвиненому інтерфейсу та великій кількості вбудованих функцій, він є потужним інструментом для розв'язання завдань, що ставляться в інженерній практиці.

Таким чином, програмний комплекс ANSYS здатний не лише значно зменшити час на вирішення складних інженерних задач, а й покращити точність розрахунків та забезпечити високу ефективність процесу моделювання та аналізу. Враховуючи всі ці можливості, програмний комплекс ANSYS є більш ніж достатнім для вирішення задач, поставлених у даній роботі, оскільки він охоплює весь спектр необхідних інструментів і методів для ефективного реалізації поставлених цілей.

					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					MP 8.132.6121м.02.03.02. ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					MP 132.6121м.02.03.03. ПЗ			
Змін.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дата				
Студент	Бреус М.С.				3. Моделирование і дослідження напружено-деформованого стану	Літ.	Арк.	Аркушів
Консультант							37	
Керівник	Ярос Ю.О..					ХННІ НУК		
Н. Контр.								
Зав.кафедр.	Матвієнко М.В.							

3. Моделювання і дослідження напружено-деформованого стану

3.1 Варіанти досліджених моделей

Одна з основних проблем при отриманні якісних з'єднань і вузлів із різних матеріалів за допомогою дифузійного зварювання та паяння полягає в появі залишкових напружень і деформацій, які можуть призвести до порушення точності і працездатності вузла, зокрема до руйнування крихких матеріалів.

Процес охолодження після паяння та дифузійного зварювання умовно можна поділити на три етапи:

1. Область високих температур: на цьому етапі пружні деформації майже відсутні, і головну роль відіграють пластичні деформації та деформації повзучості.

2. Область середніх температур: на цьому етапі пружні деформації та деформації повзучості залишаються малими, а основну роль відіграють миттєві пластичні деформації.

3. Область низьких температур: на цьому етапі пластичні деформації та деформації повзучості практично відсутні, і основну роль відіграють пружні деформації.

З точки зору залишкових напружень найбільшу практичну важливість має останній етап, оскільки саме в ньому відбувається формування пружних деформацій, які визначають рівень напружень у з'єднанні. В перших двох етапах пружні деформації малі або практично відсутні через низький модуль пружності та межу плинності, а також через процеси релаксації, що протікають при повільному охолодженні.

Тому на першому етапі дослідження була розглянута пружна стадія роботи вузлів з урахуванням властивостей матеріалів у діапазоні температур паяння і дифузійного зварювання. Далі були вирішені пластичні задачі, і порівняні їх результати з результатами пружних розрахунків. Дослідження проводились для вузлів, отриманих пайкою під тиском, без урахування тонкого прошарку припою, оскільки його вплив є незначним.

					MP 8.132.6121м.02.03.03. ПЗ	Арк
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Моделювання здійснювалося на циліндричних вузлах за допомогою програмного комплексу ANSYS (Student) із застосуванням осесиметричних задач та кінцевих елементів типу PLANE182. Модель була рівномірно розбита на квадратні елементи розміром $0,02 \times 0,02$ мм. На рис. 3.1 наведені загальний вигляд вузла та перетин його скінчено-елементної моделі, де цифра 1 позначає мідну втулку, а цифра 2 – графітну. Цю модель можна використовувати також для з'єднань, виготовлених пайкою під тиском, з умовою, що прошарок припою буде мати незначний вплив на розрахунки.

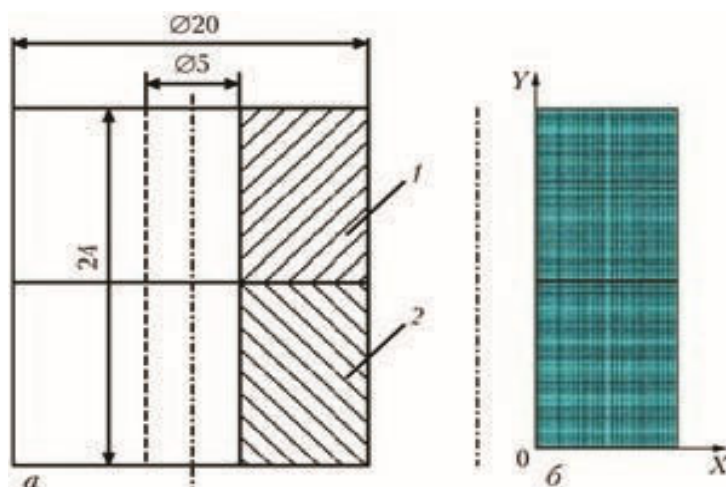


Рисунок 3.1. Загальний вигляд вузла В-В і перетин його скінчено-елементної моделі.

Теплофізичні властивості міді та графіту, використані в розрахунках, наведені в таблиці 3.1. Вибір цих матеріалів обумовлений їх широким використанням в інженерних конструкціях завдяки їх високій теплопровідності, механічним властивостям і здатності витримувати великі температурні навантаження.

Для вивчення загальних закономірностей формування залишкових напружень (НДС) було проведено дослідження процесу охолодження вузла в температурному інтервалі від 900 до 500 °С. Важливою особливістю цього процесу є те, що в цей температурний діапазон міді, зокрема, значну роль відіграє її повзучість, що суттєво впливає на релаксацію напружень. Повзучість міді в умовах високих температур здатна зменшити величину залишкових

					MP 8.132.6121м.02.03.03. ПЗ	Арк
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напружень, оскільки цей процес дозволяє матеріалу деформуватися під дією напружень без руйнування, поступово знижуючи внутрішнє напруження в системі.

Для проведення розрахунків були використані вузли з конкретними геометричними характеристиками: радіус (ширина КЕ моделі) вузла R (b) становить 20 мм, а висота вузлів для двох матеріалів — $h_1 = 12$ мм і $h_2 = 12$ мм. Ці розміри були обрані для того, щоб моделювати стандартні умови з'єднання мідної та графітної частини в межах типового промислового застосування.

Подібна геометрія дозволяє наочно оцінити, як різні матеріали з різними теплофізичними властивостями реагують на охолодження та які зміни в їх напружено-деформованому стані можуть виникнути в результаті процесу зварювання або паяння. У подальших етапах дослідження буде проаналізовано вплив температурного поля та механічних властивостей кожного матеріалу на загальний процес охолодження та поведінку залишкових напружень у вузлі.

Таблиця 3.1. Теплофізичні властивості міді і графіту.[3]

Матеріали	Температура, °C	Модуль пружності $E \cdot 10^3$, МПа	Коефіцієнт Пуассона	ТКЛР $\cdot 10^6$, 1/град	Межа плинності, МПа	Модуль зміцнення $\cdot 10^3$, МПа
Графіт	20	9,3	0,18	4,8	-	-
	200	9,4		5,0	-	-
	400	9,8		5,1	-	-
	700	10,3		5,5	-	-
	900	10,8		5,7	-	-
Мідь	20	125	0,34	16,7	69	1,5
	200	110		17,2	60	1,3
	400	100		17,8	45	0,9
	700	60		19,4	17,3	0,8
	800	40		20,5	11,5	0,7
	900	38		19,8	8,5	0,6

Для визначення закономірностей впливу різних режимів охолодження на залишкові напруження (НДС) будуть проведені моделювання для п'яти варіантів зниження температури в діапазоні від 900 °С до 500 °С:

1. Пружне рішення при зниженні температури до 500 °С (варіант 1).
2. Пружно-пластичне рішення при швидкому зниженні температури до 500 °С, враховуючи малі деформації повзучості (варіант 2).
3. Пружно-пластичне рішення з урахуванням повзучості при поступовому зниженні температури до 500 °С протягом 60 секунд, з подальшою витримкою при 500 °С протягом 6000 секунд (варіант 3).
4. Пружно-пластичне рішення з урахуванням повзучості при поступовому зниженні температури до 500 °С протягом 600 секунд, з подальшою витримкою при 500 °С протягом 6000 секунд (варіант 4).
5. Пружно-пластичне рішення з урахуванням повзучості при поступовому зниженні температури до 500 °С протягом 6000 секунд (варіант 5).

Ці варіанти дозволять дослідити, як різні швидкості охолодження та тривалість витримки на певній температурі впливають на поведінку матеріалу та утворення залишкових напружень в з'єднанні.

Для варіантів 3-5 швидкість повзучості міді визначалась за спеціальним рівнянням:

$$\varepsilon = C_1 e^{C_2 - C_3}$$

де $C_1 = 1,67 \times 10^{-30}$, $C_2 = 5$, $C_3 = 25872$ – це коефіцієнти, які були отримані експериментальним шляхом при вивченні повзучості міді.

Проводився аналіз розподілу напружень, деформацій та переміщень на різних етапах охолодження, зокрема в моменти завершення зниження температури для всіх варіантів, а також при завершенні витримки на температурі 500 °С для варіантів 3 і 4.

					MP 8.132.6121м.02.03.03. ПЗ	Арк
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Радіальні напруження при паянні міді з графітом

На рис. 3.2 показані поля радіальних напружень (σ_x) для різних варіантів охолодження та витримки. Варіанти позначені номерами 1-5.

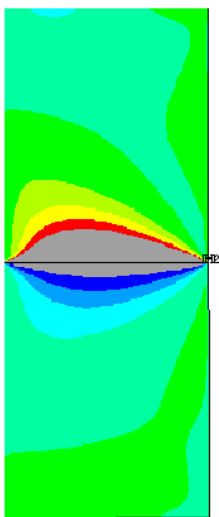
Аналізуючи поля напружень, можна помітити, що у варіанті 1 стискаючі напруження є найбільшими серед усіх варіантів, досягаючи -613 МПа, а максимальні розтягуючі напруження становлять 1280 МПа.

У варіанті 2 результати виявились кращими: максимальні розтягуючі напруження зменшились до 573 МПа, а стискаючі напруження знизились до -501 МПа.

У варіанті 3 максимальні напруження як розтягу, так і стиску є меншими порівняно з попередніми двома варіантами. Це пояснюється поступовим охолодженням до 500°C протягом 60 секунд та подальшою витримкою при 500°C протягом 6000 секунд. Максимальні стискаючі напруження становлять -427 МПа, а розтягуючі напруження досягають 391 МПа, що також є меншим, ніж у варіантах 1 та 2.

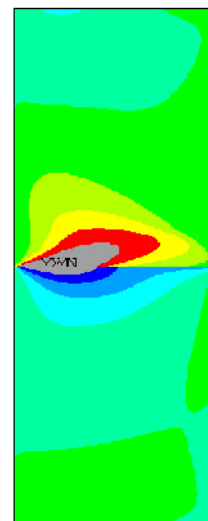
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =10
TIME=60
SX (AVG)
RSYS=0
DMX =.129E-03
SMN =-.613E+08
SMX =.128E+09

1



NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =16
TIME=60
SX (AVG)
RSYS=0
DMX =.132E-03
SMN =-.501E+08
SMX =.573E+08

2



					MP 8.132.6121м.02.03.03. ПЗ	Арк
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

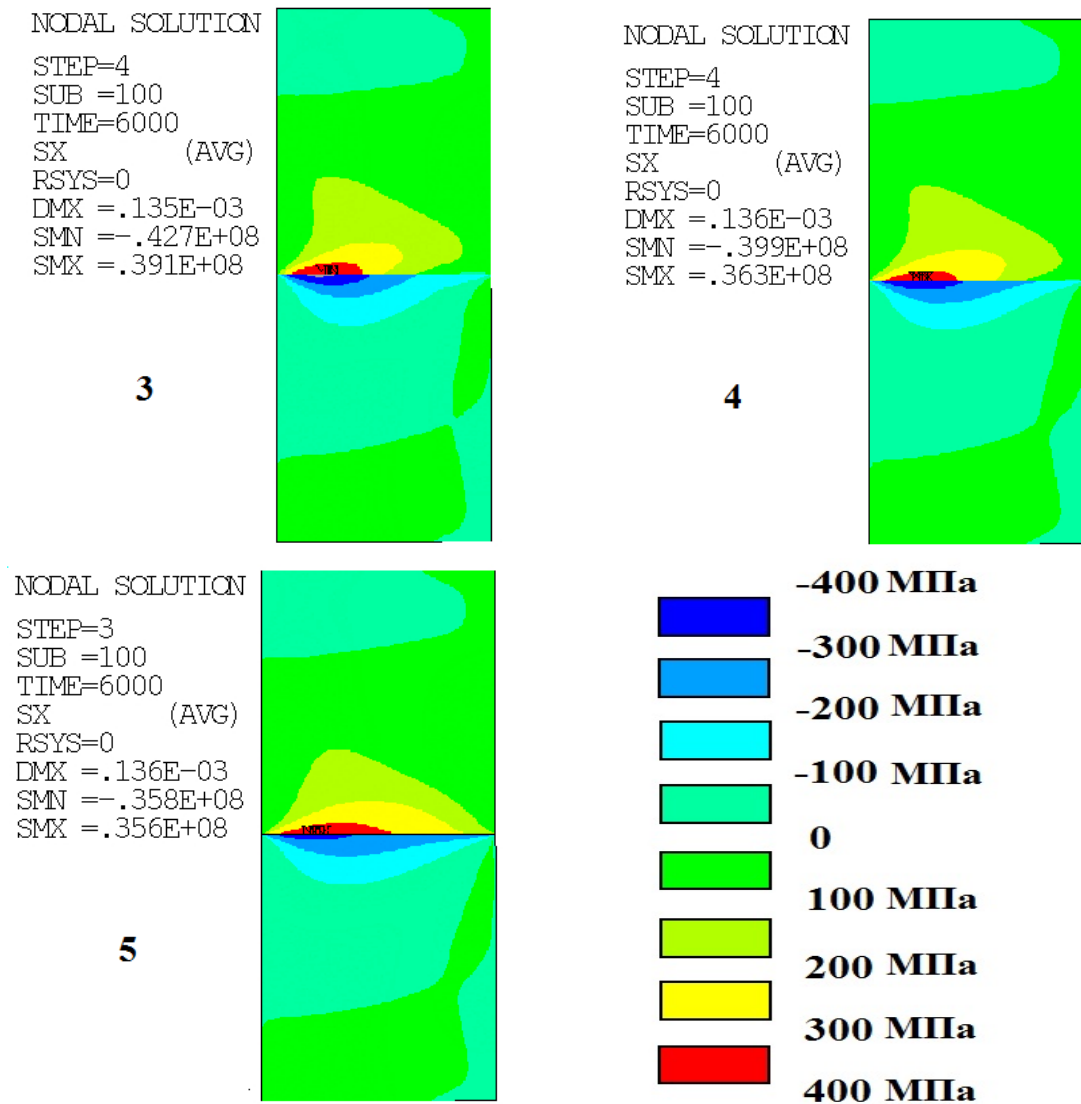


Рисунок 3.2 Поля радіальних напружень σ_x у варіантах 1-5

На рисунку 3.2 представлені поля радіальних напружень (σ_x) для варіантів 1-5. У варіанті 4 час поступового зниження температури був збільшений до 600 секунд, при цьому час витримки залишився незмінним. Поля напружень практично не змінились у порівнянні з варіантом 3, але їх величина зменшилась. Максимальні стискаючі напруження майже досягають -400 МПа, а розтягуючі – 363 МПа. Це значно менше, ніж у попередніх варіантах.

У варіанті 5 витримку було прибрано, а час поступового зниження температури після паяння збільшили до 6000 секунд. Це змінило характер розподілу напружень: область їх виникнення розподілилась по ширині паяного з'єднання.

Максимальні стискаючі напруження досягли -358 МПа, а розтягуючі напруження – 356 МПа.

Таким чином, порівнюючи всі варіанти, можна зробити висновок, що у варіанті 5 спостерігаються найменші радіальні напруження, що свідчить про те, що збільшення часу поступового зниження температури допомогло зменшити ці напруження.

3.3 Осьові напруження

На рисунку 3.3 представлені поля осьових напружень (σ_y) для всіх п'яти варіантів охолодження та витримки. Аналіз цих полів дозволяє виявити залежність величин стискаючих і розтягуючих напружень від умов охолодження та витримки.

У варіанті 1 спостерігається максимальний рівень стискаючих напружень, які досягають -2570 МПа, що свідчить про сильне стиснення матеріалу. У той же час максимальні розтягуючі напруження досягають 431 МПа.

У варіанті 2 спостерігається зменшення максимальних розтягуючих напружень до 425 МПа, а стискаючі напруження зменшуються до -521 МПа, що вказує на значне полегшення деформацій у порівнянні з варіантом 1.

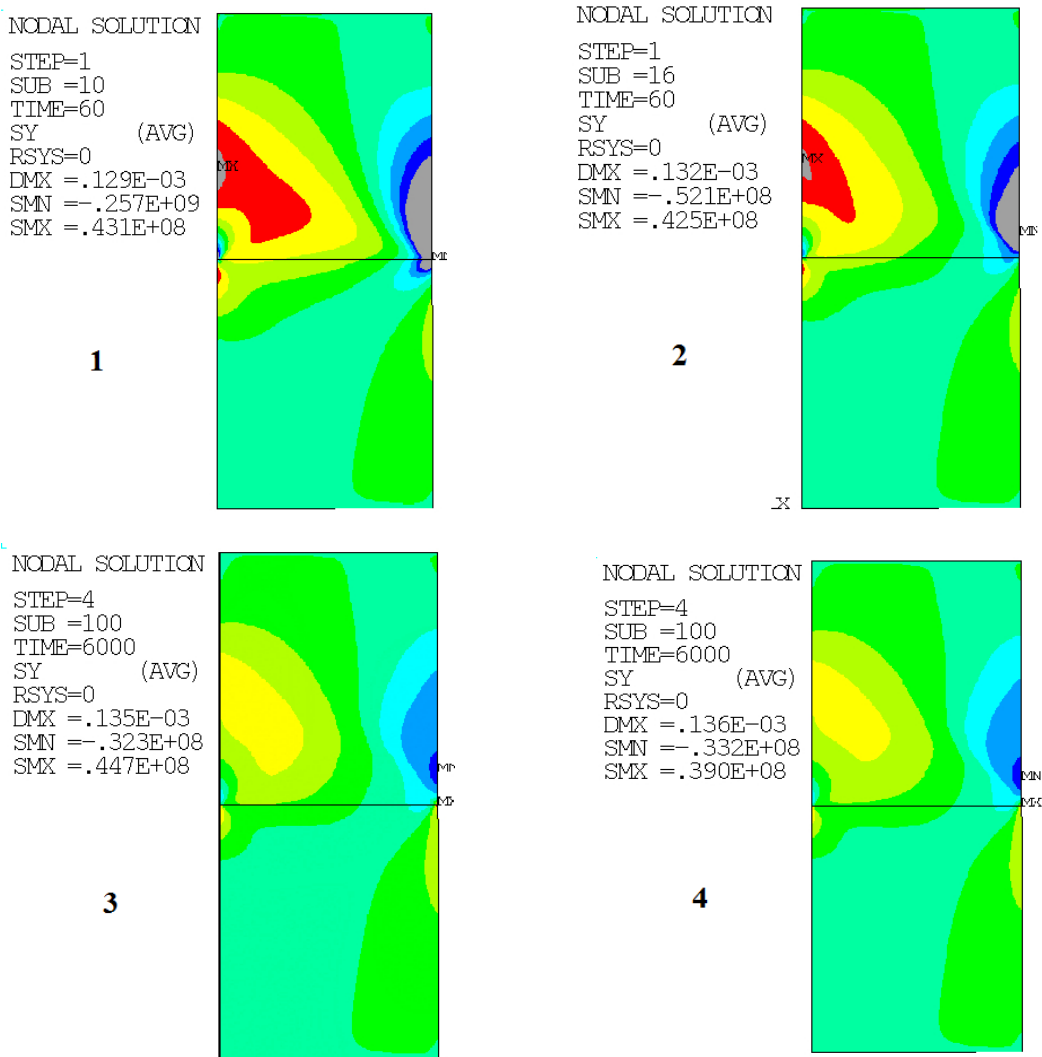
У варіанті 3, напруження як в області стиску, так і розтягування збільшились порівняно з попередніми варіантами. Стискаючі напруження досягли -323 МПа, а розтягуючі — 447 МПа. Це свідчить про більш складну напружену ситуацію в порівнянні з варіантами 1 та 2.

У варіанті 4, хоча стискаючі напруження дещо збільшились до -332 МПа в порівнянні з варіантом 3, розтягуючі напруження знизились до 390 МПа, що може вказувати на більш збалансовану ситуацію з меншими деформаціями в розтягнутій області.

Нарешті, у варіанті 5 спостерігаються найменші значення розтягуючих напружень — всього 250 МПа. Однак, стискаючі напруження зросли до -444 МПа, що є вищим, ніж у варіантах 3 та 4, але все ж меншим за варіанти 1 та 2.

					MP 8.132.6121м.02.03.03. ПЗ	Арк
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, варіант 5 продемонстрував найменші розтягуючі напруження, але з певним збільшенням стискаючих напружень порівняно з іншими варіантами. Це дозволяє зробити висновок про важливість збалансованого підходу до зміни температури й витримки, щоб мінімізувати як розтягуючі, так і стискаючі напруження в з'єднаннях.



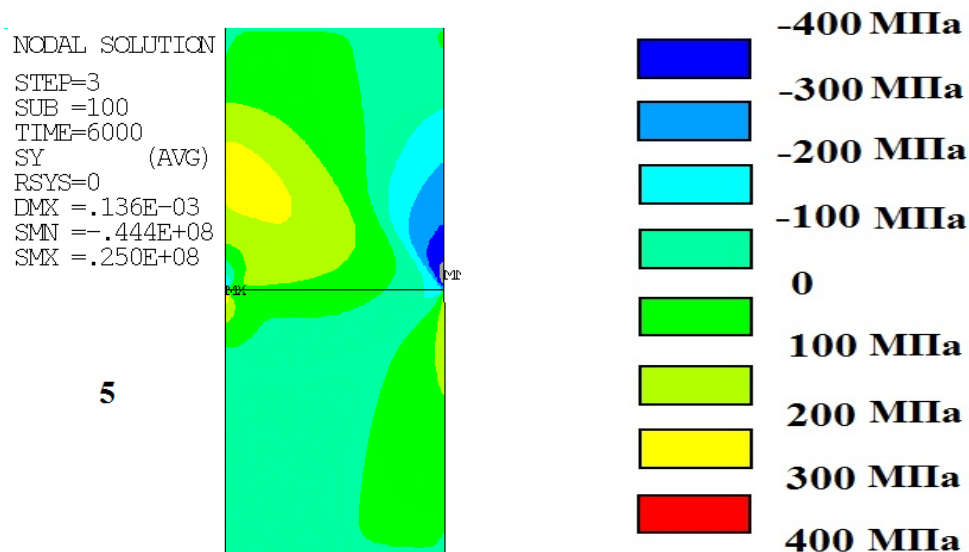


Рисунок 3.3 Поля осевих напружень σ_y у варіантах 1-5

3.4 Тангенціальні напруження

Проаналізувавши поля σ^z на рисунку 3.4, можна зробити кілька важливих висновків щодо впливу різних режимів охолодження на рівень напружень. У варіанті 1 спостерігається найвищий рівень напружень серед усіх зразків. Максимальні значення стискаючих напружень досягають -502 МПа, що вказує на значне стиснення матеріалу. Розтягуючі напруження в цьому варіанті також досягають високих значень, зокрема 1240 МПа, що може призвести до виникнення тріщин або інших дефектів у матеріалі, особливо у крихких матеріалах.

Варіант 2 демонструє кращий результат порівняно з попереднім зразком, що підтверджується значним зменшенням розтягуючих напружень до 755 МПа. Хоча максимальні стискаючі напруження залишаються на рівні -522 МПа, цей варіант все ж показує більш оптимальні умови охолодження в порівнянні з варіантом 1.

У варіанті 3, завдяки поступовому зниженню температури та витримці на низьких температурах, вдалося значно знизити як стискаючі, так і розтягуючі напруження. Стискаючі напруження зменшуються до -406 МПа, що є кращим результатом, ніж у попередніх варіантах. Крім того, розтягуючі напруження

знижуються до 454 МПа, що також є значним покращенням порівняно з варіантом 2.

Варіант 4 показав ще кращі результати, особливо за розтягуючими напруженнями. Збільшення часу охолодження призвело до їх зниження до 424 МПа, що є помітно меншим значенням порівняно з попередніми варіантами. Крім того, стискаючі напруження зменшуються до -392 МПа, що також свідчить про більш збалансовану ситуацію в порівнянні з іншими варіантами.

Нарешті, варіант 5, в якому витримка після паяння була скасована, але час поступового зниження температури збільшений до 6000 секунд, показав найменші стискаючі напруження, які склали -386 МПа. Проте, цей варіант призвів до зростання розтягуючих напружень до 430 МПа, що є дещо вищим порівняно з попередніми варіантами, але все одно нижчим, ніж у варіанті 1.

Отже, на основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що оптимальне охолодження з поступовим зниженням температури протягом довгого часу сприяє зменшенню напружень у матеріалі, що знижує ризик виникнення деформацій або пошкоджень. Водночас, необхідно враховувати, що кожен варіант має свої переваги та недоліки в залежності від того, яке значення напружень (стиску чи розтягу) є критичнішим для конкретного матеріалу чи конструкції.

3.5 Еквівалентні напруження

Аналіз полів еквівалентних напружень ($\sigma_{\text{сф}v}$) для варіанту 4 показав, що завдяки збільшенню часу охолодження та тривалій витримці після паяння, максимальні еквівалентні напруження значно знизились до 647 МПа. Це вказує на ефективність подовженого часу охолодження та витримки, що дозволяє досягти кращих результатів у зниженні напружень порівняно з попередніми варіантами.

Найкращий результат був досягнутий у варіанті 5, де час поступового охолодження був збільшений до 6000 секунд. У цьому варіанті максимальні еквівалентні напруження досягли лише 528 МПа, що є найнижчим значенням серед усіх варіантів. Це свідчить про те, що тривалий період охолодження сприяє

					MP 8.132.6121м.02.03.03. ПЗ	Арк
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

більш рівномірному зниженню температури та зменшенню внутрішніх напружень у матеріалі.

Порівнюючи з іншими варіантами, в варіанті 1 спостерігається найвищий рівень еквівалентних напружень, де максимальне значення досягло 3380 МПа, що значно перевищує результати в інших варіантах. Мінімальні напруження у варіанті 1 становлять лише 15,6 МПа, що вказує на значну варіативність розподілу напружень.

У варіанті 2 максимальні еквівалентні напруження зменшились до 726 МПа, що є значним покращенням порівняно з варіантом 1. Це показує, що навіть незначне скорочення часу охолодження може призвести до помітного зниження рівня напружень.

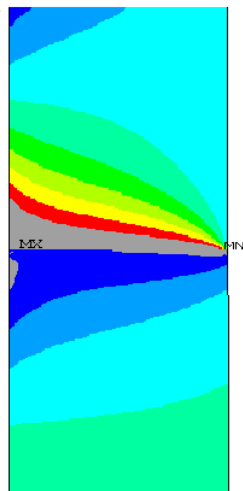
Варіант 3 не дав значного зменшення еквівалентних напружень, і максимальні значення залишаються на рівні 702 МПа. Це свідчить про те, що навіть з поступовим охолодженням ефективність зниження напружень не була настільки значною, як у варіантах з більш тривалим часом охолодження, таких як варіанти 4 і 5.

Отже, з аналізу можна зробити висновок, що збільшення часу охолодження та витримки після паяння дозволяє значно знижувати еквівалентні напруження, зокрема, найкращі результати були досягнуті в варіанті 5 з тривалим охолодженням протягом 6000 секунд.

					MP 8.132.6121м.02.03.03. ПЗ	Арк
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

NODAL SOLUTION

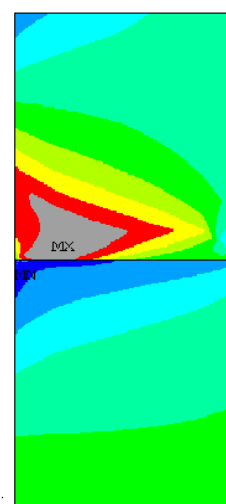
STEP=1
SUB =10
TIME=60
SZ (AVG)
RSYS=0
DMX =.129E-03
SMN =-.692E+08
SMX =.124E+09



1

NODAL SOLUTION

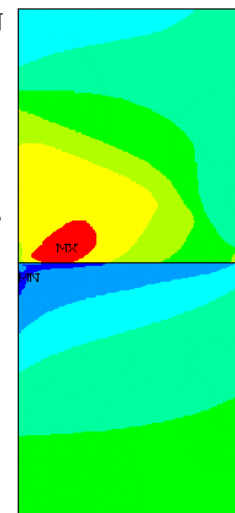
STEP=1
SUB =16
TIME=60
SZ (AVG)
RSYS=0
DMX =.132E-03
SMN =-.502E+08
SMX =.755E+08



2

NODAL SOLUTION

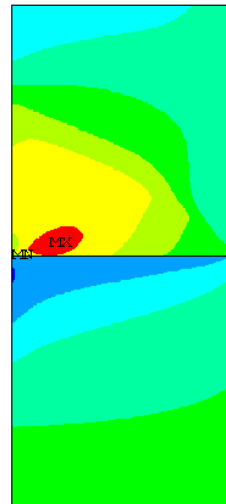
STEP=4
SUB =100
TIME=6000
SZ (AVG)
RSYS=0
DMX =.135E-03
SMN =-.406E+08
SMX =.454E+08



3

NODAL SOLUTION

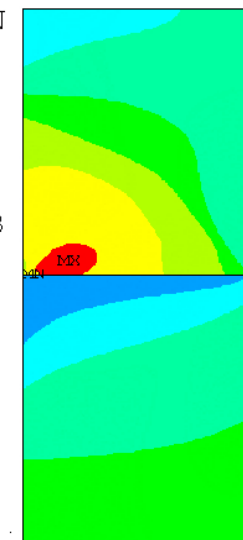
STEP=4
SUB =100
TIME=6000
SZ (AVG)
RSYS=0
DMX =.136E-03
SMN =-.392E+08
SMX =.424E+08



4

NODAL SOLUTION

STEP=3
SUB =100
TIME=6000
SZ (AVG)
RSYS=0
DMX =.136E-03
SMN =-.386E+08
SMX =.430E+08



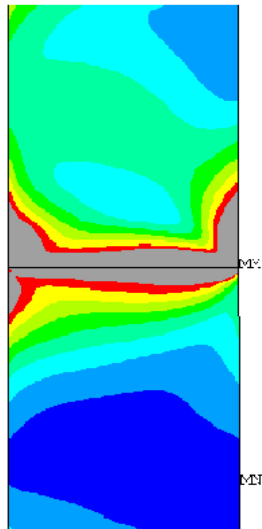
5



Рисунок 3.4 Поля тангенціальних напружень σ_z у варіантах 1-5

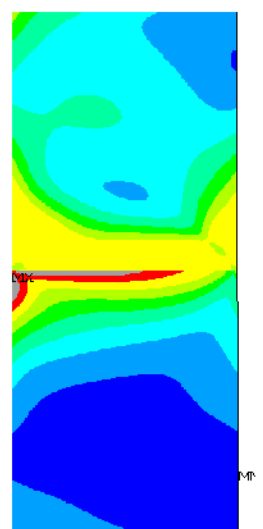
NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =10
 TIME=60
 SEQV (AVG)
 DMX =.129E-03
 SMN =.156E+07
 SMX =.338E+09

1



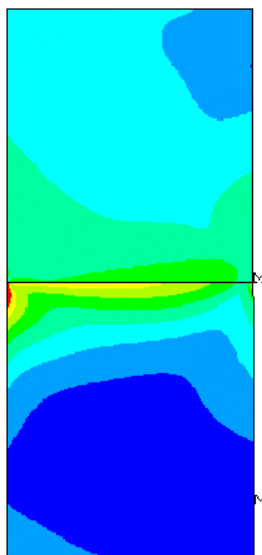
NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =16
 TIME=60
 SEQV (AVG)
 DMX =.132E-03
 SMN =.155E+07
 SMX =.726E+08

2



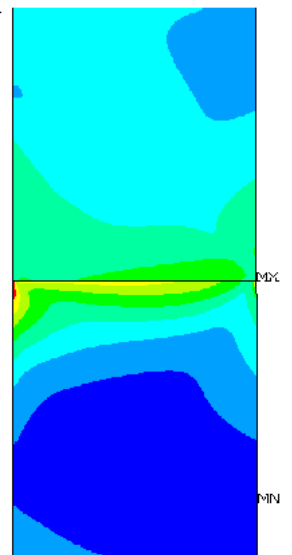
NODAL SOLUTION
 STEP=4
 SUB =100
 TIME=6000
 SEQV (AVG)
 DMX =.135E-03
 SMN =.146E+07
 SMX =.702E+08

3



NODAL SOLUTION
 STEP=4
 SUB =100
 TIME=6000
 SEQV (AVG)
 DMX =.136E-03
 SMN =.143E+07
 SMX =.647E+08

4



NODAL SOLUTION
 STEP=3
 SUB =100
 TIME=6000
 SEQV (AVG)
 DMX =.136E-03
 SMN =.133E+07
 SMX =.528E+08

5

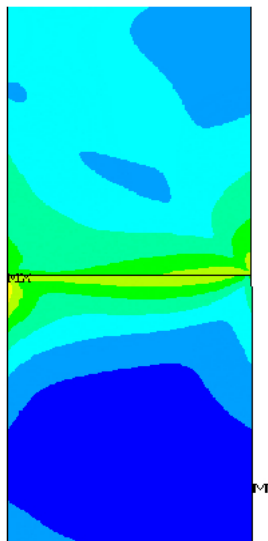


Рисунок 3.5 Поля еквівалентних напружень $\sigma_{\text{екв}}$ для варіантів 1-5

Аналіз полів еквівалентних напружень (σ_{eqv}) для варіанту 4 показав, що завдяки збільшенню часу охолодження та тривалій витримці після паяння, максимальні еквівалентні напруження значно знизились до 647 МПа. Це вказує на ефективність подовженого часу охолодження та витримки, що дозволяє досягти кращих результатів у зниженні напружень порівняно з попередніми варіантами.

Найкращий результат був досягнутий у варіанті 5, де час поступового охолодження був збільшений до 6000 секунд. У цьому варіанті максимальні еквівалентні напруження досягли лише 528 МПа, що є найнижчим значенням серед усіх варіантів. Це свідчить про те, що тривалий період охолодження сприяє більш рівномірному зниженню температури та зменшенню внутрішніх напружень у матеріалі.

Порівнюючи з іншими варіантами, в варіанті 1 спостерігається найвищий рівень еквівалентних напружень, де максимальне значення досягло 3380 МПа, що значно перевищує результати в інших варіантах. Мінімальні напруження у варіанті 1 становлять лише 15,6 МПа, що вказує на значну варіативність розподілу напружень.

У варіанті 2 максимальні еквівалентні напруження зменшились до 726 МПа, що є значним покращенням порівняно з варіантом 1. Це показує, що навіть незначне скорочення часу охолодження може призвести до помітного зниження рівня напружень.

Варіант 3 не дав значного зменшення еквівалентних напружень, і максимальні значення залишаються на рівні 702 МПа. Це свідчить про те, що навіть з поступовим охолодженням ефективність зниження напружень не була настільки значною, як у варіантах з більш тривалим часом охолодження, таких як варіанти 4 і 5.

З аналізу можна зробити висновок, що збільшення часу охолодження та витримки після паяння дозволяє значно знижувати еквівалентні напруження, зокрема, найкращі результати були досягнуті в варіанті 5 з тривалим охолодженням протягом 6000 секунд.

					MP 8.132.6121м.02.03.03. ПЗ	Арк
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.6 Епюри радіальних переміщень точок на зовнішній поверхні

Аналіз епюр радіальних переміщень точок зовнішньої поверхні, представлених на рис. 3.6, показав цікаву динаміку деформацій, що виникають у результаті з'єднання двох матеріалів з різною жорсткістю, зокрема міді та графіту. У варіанті 1, коли здійснюється пружне навантаження, вигин зберігає певну косиметрію відносно площини стику, однак він змінюється під впливом різної жорсткості матеріалів. У цьому випадку вигин з боку більш жорсткого матеріалу, міді, є меншим, оскільки матеріал має вищу здатність до опору деформаціям. З іншого боку, вигин з боку графіту, менш жорсткого матеріалу, значно збільшується. Ці відмінності у вигині обумовлені різницею в механічних властивостях матеріалів, зокрема, в їх здатності до пластичних деформацій при пружному навантаженні.

У варіантах 2-5, коли на матеріали починають діяти миттєві пластичні деформації та деформації повзучості, відбуваються суттєві зміни в характері вигину. У варіанті 2, де відбувається швидке охолодження, вигин в більш жорсткому матеріалі (мідь) збільшується. Це пояснюється тим, що мідь, хоч і є жорстким матеріалом, проявляє пластичні властивості при відповідних температурах, що збільшує її здатність до деформації. Водночас, вигин в менш жорсткому матеріалі (графіт) зменшується, оскільки при поступовому охолодженні та пластичному деформуванні графіт стає більш стійким до змін, а тому його вигин зменшується.

Ключовим моментом є те, що за допомогою короточасних пластичних деформацій, які виникають при швидкому охолодженні, а також деформацій повзучості в подальших варіантах (3-5), з'являється певна компенсація різниці в жорсткості між матеріалами. Зокрема, пластичні деформації міді, які значно збільшують вигин у цьому матеріалі, можуть бути компенсовані зменшенням вигину графіту, що відбувається завдяки меншій жорсткості цього матеріалу. В результаті, вигин в районі стику матеріалів наближається до симетричного стану. Таким чином, тривале охолодження та поступове зниження

					MP 8.132.6121м.02.03.03. ПЗ	Арк
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температури дозволяють вирівняти деформації зовнішньої поверхні з'єднання, що сприяє більш рівномірному розподілу навантажень і підвищує стабільність з'єднання.

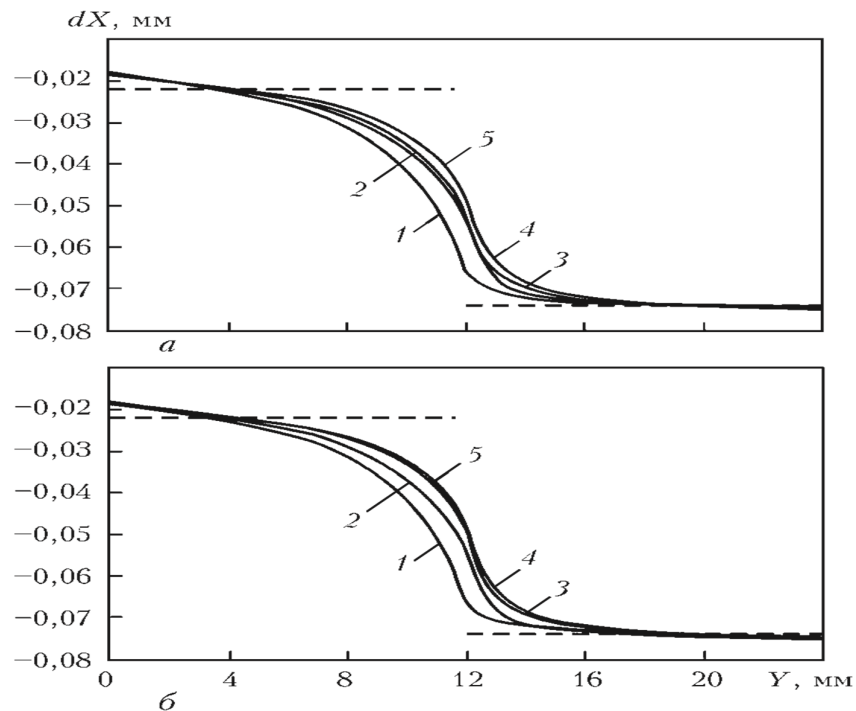


Рисунок 3.6 Епюри радіальних переміщень точок зовнішньої поверхні після охолодження (а), та після охолодження і витримки (б)

Аналіз епюр радіальних переміщень точок зовнішньої поверхні, представлених на рис. 3.6, показав цікаву динаміку деформацій, що виникають у результаті з'єднання двох матеріалів з різною жорсткістю, зокрема міді та графіту. У варіанті 1, коли здійснюється пружне навантаження, вигин зберігає певну косиметрію відносно площини стику, однак він змінюється під впливом різної жорсткості матеріалів. У цьому випадку вигин з боку більш жорсткого матеріалу, міді, є меншим, оскільки матеріал має вищу здатність до опору деформаціям. З іншого боку, вигин з боку графіту, менш жорсткого матеріалу, значно збільшується. Ці відмінності у вигині обумовлені різницею в механічних властивостях матеріалів, зокрема, в їх здатності до пластичних деформацій при пружному навантаженні.

У варіантах 2-5, коли на матеріали починають діяти миттєві пластичні деформації та деформації повзучості, відбуваються суттєві зміни в характері вигину. У варіанті 2, де відбувається швидке охолодження, вигин в більш жорсткому матеріалі (мідь) збільшується. Це пояснюється тим, що мідь, хоч і є жорстким матеріалом, проявляє пластичні властивості при відповідних температурах, що збільшує її здатність до деформації. Водночас, вигин в менш жорсткому матеріалі (графіт) зменшується, оскільки при поступовому охолодженні та пластичному деформуванні графіт стає більш стійким до змін, а тому його вигин зменшується.

Ключовим моментом є те, що за допомогою короткочасних пластичних деформацій, які виникають при швидкому охолодженні, а також деформацій повзучості в подальших варіантах (3-5), з'являється певна компенсація різниці в жорсткості між матеріалами. Зокрема, пластичні деформації міді, які значно збільшують вигин у цьому матеріалі, можуть бути компенсовані зменшенням вигину графіту, що відбувається завдяки меншій жорсткості цього матеріалу. В результаті, вигин в районі стику матеріалів наближається до симетричного стану. Таким чином, тривале охолодження та поступове зниження температури дозволяють вирівняти деформації зовнішньої поверхні з'єднання, що сприяє більш рівномірному розподілу навантажень і підвищує стабільність з'єднання.

3.7 Епюри радіальних переміщень точок на внутрішній поверхні

Характер радіальних переміщень точок внутрішньої бокової поверхні матеріалу має більш складну природу, що виявляється у різному типі вигину для двох матеріалів – міді і графіту, з різними коефіцієнтами теплового лінійного розширення (ТКЛР). Як показано на рис. 3.7, для графіту, матеріалу з меншим ТКЛР, поверхня в безпосередній близькості від стику (1-2 мм) спочатку утворює опуклість, яка поступово переходить у увігнутість при віддаленні від з'єднання. У міді, навпаки, спостерігається увігнутість поблизу стику, яка згодом переходить у опуклість на більших відстанях.

					MP 8.132.6121м.02.03.03. ПЗ	Арк
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Такий складний характер переміщень можна пояснити поєднанням двох факторів. Перший з них — це різниця в переміщеннях верхньої та нижньої частин втулки через різні діаметри кожної частини, оскільки мідь і графіт мають різні температурні властивості. Другий фактор — це різна зміна ширини перерізу матеріалів під час їх температурного скорочення. Мідь, з більшим ТКЛР, має більшу здатність до розширення та стиску порівняно з графітом, що спричиняє різницю в температурних деформаціях і, відповідно, зміні розмірів перерізу.

Ці два механізми в поєднанні призводять до формування опуклості на зовнішній поверхні (з боку міді) та увігнутості на внутрішній поверхні (з боку графіту), що є наслідком взаємодії температурних деформацій у двох різних матеріалах. Така деформація відбувається через нерівномірне розподілення температурних змін та зсуву матеріалів, що спричиняє нерівномірний вигин, особливо на внутрішній поверхні втулки.

Цей процес підтверджується відсутністю симетрії полів пластичних деформацій та епюр дотичних напружень відносно середини товщини втулки. Визначення рівня дотичних напружень на середині товщини втулки (близько 20 МПа) дозволяє кількісно охарактеризувати вплив зсуву частин втулки, що виникає внаслідок різних температурних змін і механічних деформацій.

При зміні режиму охолодження характер вигину внутрішньої поверхні залишається незмінним, однак зменшується величина переміщень, якщо охолодження відбувається повільніше (варіанти 3-5). Це свідчить про те, що при поступовому зниженні температури (і, відповідно, зменшенні швидкості охолодження) деформації стають менш вираженими, а отже, вигин внутрішньої поверхні втулки зменшується, знижуючи вплив температурних деформацій. В процесі витримки цей ефект ще більше зменшується, що дозволяє досягти більш рівномірного розподілу деформацій і зменшення впливу термічних напружень на кінцеву форму з'єднання.

					MP 8.132.6121м.02.03.03. ПЗ	Арк
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

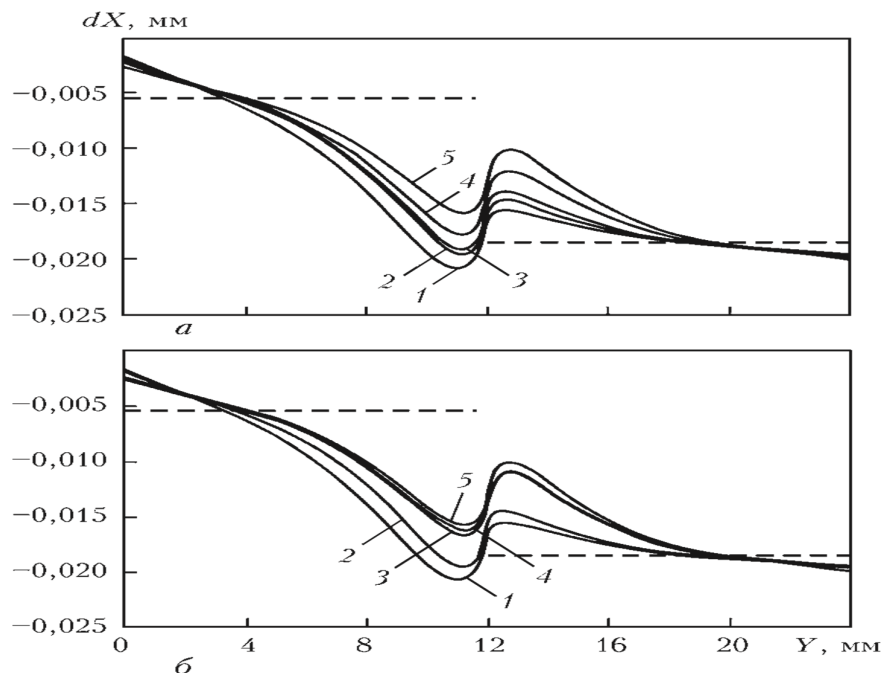


Рисунок 3.7 Епюри радіальних переміщень точок внутрішньої поверхні після охолодження (а), та після охолодження і витримки (б)

3.8 Епюри осьових переміщень точок на зовнішній поверхні

На зовнішній поверхні спостерігаються цікаві зміни в розподілі напружень, які залежать від різниці в коефіцієнтах теплового лінійного розширення (ТКЛР) між мідною та графітовою втулками. Мідь, яка має більший ТКЛР, створює стискаючі напруження, тоді як графіт, з меншим ТКЛР, зазнає розтягуючих напружень. Це явище чітко відображається на рисунку 3.8, де видно, що розтягуючі напруження на зовнішній поверхні досягають свого максимального значення на відстані 2-3 мм від стику. Далі, по мірі наближення до стику, ці напруження поступово зменшуються до приблизно половини свого максимального значення. Це є наслідком різних температурних змін, що відбуваються в результаті різних ТКЛР матеріалів, які створюють нерівномірний розподіл температурних деформацій на поверхнях.

З додаванням етапу витримки при 500 °С (варіанти 3 і 4), коли до короткочасних температурних деформацій додаються деформації повзучості, відбуваються зміни в розподілі напружень. Повзучість, як механізм, який

проявляється при тривалих навантаженнях, спричиняє збільшення максимальних напружень у графітовій частині стику. Замість того, щоб зменшуватися, розтягуючі напруження в графітовому матеріалі, навпаки, різко зростають до 30-35 МПа, а точка максимуму переміщується ближче до самого стику. Це свідчить про те, що під час витримки при високій температурі, на графіт впливають додаткові фактори, зокрема зміна його мікроструктури через повзучість, що призводить до зростання рівня напружень у цій частині вузла.

Таким чином, зміна характеристик напружень після охолодження та при подальшій витримці демонструє складний вплив температурних і механічних деформацій. Відбувається перенавантаження на матеріал з меншою жорсткістю (графіт), що стає особливо вираженим в умовах повзучості при високих температурах. Це має важливе значення для розуміння поведінки таких з'єднань під впливом різних теплових та механічних навантажень, оскільки ці процеси можуть призводити до змін у довговічності і міцності з'єднань при реальних умовах експлуатації.

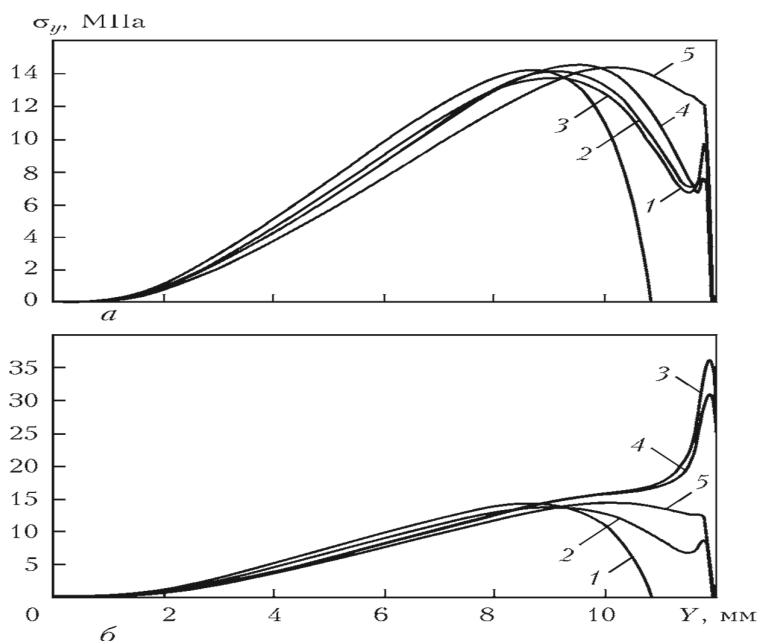


Рисунок 3.8 Епюри осевих переміщень точок зовнішньої поверхні після охолодження (а), та після охолодження і витримки (б)

3.9 Епюри осьових переміщень точок на внутрішній поверхні

Розподіл осьових напружень на внутрішній поверхні втулки (рис. 3.9) має більш складний характер порівняно з зовнішньою поверхнею через різну поведінку матеріалів із різними коефіцієнтами теплового розширення. У графітовій втулці поблизу стику спостерігаються розтягуючі осьові напруження, які зменшуються до нуля на відстані 2-3 мм від стику, а потім переходять у стискаючі напруження, коли відстань від стику збільшується. Знову ж, на відстані від стику, напруження стиску зменшуються до нуля на торці втулки. Такий розподіл напружень обумовлений температурними деформаціями і різними тепловими властивостями матеріалів (міді та графіту), що викликає нерівномірне теплове скорочення і відповідно — різну поведінку напружень в матеріалах.

Цей ефект на внутрішній поверхні є результатом взаємодії двох факторів: різної температурної зміни матеріалів (через різницю в ТКЛР) і неоднорідного розподілу температур в різних частинах вузла. Спочатку графіт, який має менший ТКЛР, зазнає розтягуючих напружень, але після зменшення температури вони переходять у стискаючі на певній відстані від стику. Це характерно для зони, де матеріали взаємно "втягуються" або "розтягуються" один щодо одного в залежності від температури.

Для кращого порівняння різних варіантів, у таблиці 3.2 і на рисунку 3.10 представлені значення максимальних розтягуючих напружень в графіті після охолодження до 500 °С і витримки при цій температурі протягом 6000 с. Порівняння діаграм напружень дозволяє більш детально оцінити, як змінюється поведінка матеріалів при різних режимах охолодження та витримки, а також визначити, в яких умовах досягаються мінімальні або максимальні значення розтягуючих напружень у графітовій частині вузла.

Залежно від режиму охолодження та витримки, ці показники можуть суттєво змінюватися, оскільки тривала витримка при 500 °С може спричиняти

					МР 8.132.6121м.02.03.03. ПЗ	Арк
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

додаткові ефекти, такі як повзучість або зміну мікроструктури матеріалів, що в свою чергу впливає на рівень напружень у матеріалах з різними ТКЛР.

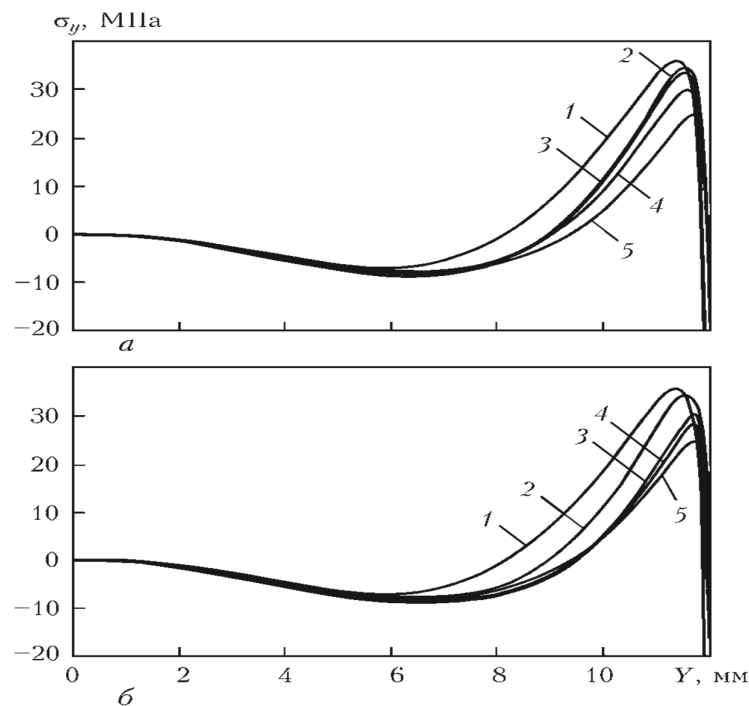


Рисунок 3.9 Епюри осьових переміщень точок внутрішньої поверхні після охолодження (а), та після охолодження і витримки (б)

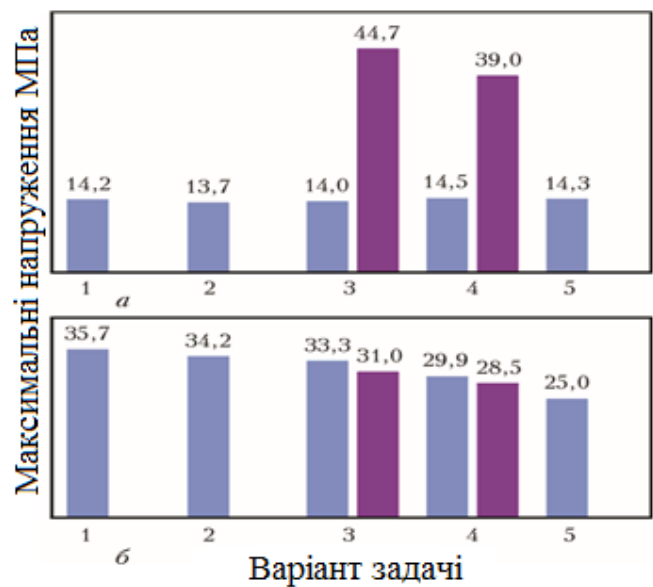


Рисунок 3.10 Максимальні напруження розтягу на зовнішньої (а) і внутрішньої (б) поверхнях графіту в варіантах 1 ... 5 після охолодження до 500 °С і витримки (вар. 3 і 4) при цій температурі

Таблиця 3.2 Максимальні розтягуючі напруження в графіті

Варі- ант	Максимальні розтягуючі напруження в графіті, МПа			
	на зовнішній поверхні		на внутрішній поверхні	
	Кінець охоло- дження	Кінець витримки	Кінець охолодження	Кінець витримки
1	14,2	-	35,7	-
2	13,7	-	34,2	-
3	14,0	44,7	33,3	31 , 0
4	14,5	39,0	29,9	28 , 5
5	14,3	14,3	25,0	25 , 0

Висновки

Аналіз епюр напружень показує, що внутрішня поверхня втулки є найбільш уразливою щодо утворення тріщин, особливо в графітовій частині. У всіх варіантах охолодження, за винятком варіанту 5, максимальні розтягуючі напруження на внутрішній поверхні графіту наближаються до межі міцності графіту на вигин. Це межі міцності для різних марок графіту: 45 МПа для графіту МПГ-8 та 34,3 МПа для графітів МПГ-6 і МПГ-7. Коли розтягуючі напруження наближаються до цих значень, матеріал стає більш схильним до виникнення тріщин, що може призвести до руйнування з'єднання. Тому внутрішня поверхня є критичною з точки зору ризику виникнення дефектів, особливо при використанні матеріалів з високими розтягуючими напруженнями.

Для зовнішньої поверхні графітової втулки небезпечними є варіанти 3 і 4, де після охолодження та витримки виникають великі розтягуючі напруження, що також можуть сприяти утворенню тріщин. Це підтверджує, що витримка після охолодження може бути не оптимальною, оскільки в таких умовах тривалі періоди витримки в поєднанні з високими напруженнями можуть істотно збільшити ймовірність руйнування матеріалу, особливо на зовнішній поверхні.

Враховуючи це, варіант 5, при якому температура знижується поступово протягом 6000 с (з 900 °С до 500 °С), є найбільш оптимальним з точки зору

					МР 8.132.6121м.02.03.03. ПЗ	Арк
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зниження ризику утворення тріщин. У цьому випадку розтягуючі напруження не перевищують 25 МПа, що значно нижче меж міцності графіту і дає можливість уникнути руйнування матеріалу. Поступове охолодження дозволяє більш рівномірно зменшувати температурні деформації, що, у свою чергу, знижує ймовірність утворення тріщин на внутрішній та зовнішній поверхнях втулки.

У той же час, варіанти з швидким охолодженням і подальшою витримкою (варіанти 1-4) є недоцільними, оскільки вони призводять до великих розтягуючих напружень на зовнішній поверхні графіту, що збільшує ризик утворення тріщин. Це вказує на необхідність контролю температурних режимів при охолодженні, щоб уникнути виникнення тріщин і забезпечити надійність з'єднань, особливо в критичних точках, де напруження найбільші.

					MP 8.132.6121м.02.03.03. ПЗ	Арк
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					MP 132.6121м.02.03. ПЗ							
Змін.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дата								
Студент		Бреус М.С.			Загальні висновки			Літ.		Арк.	Аркушів	
Консультант										62		
Керівник		Ярос Ю.О..						ХННІ НУК				
Н. Контр.												
Зав.кафедр.		Матвієнко М.В.										

Загальні висновки

1. З'єднання графіту з металами: З'єднання графіту з металами має важливе значення з економічної точки зору, а також для реалізації позитивних властивостей графітових матеріалів. Графіт відомий своєю високою теплопровідністю, електропровідністю, а також стійкістю до агресивних середовищ. Паяння металів з графітом є найбільш ефективним і економічно вигідним методом з'єднання цих матеріалів, оскільки воно дозволяє отримати високоякісні, надійні з'єднання, які забезпечують герметичність, міцність та електропровідність, що є критично важливим у багатьох промислових застосуваннях. Крім того, паяння, на відміну від інших методів з'єднання, таких як зварювання, потребує менше енергії та забезпечує кращу точність при формуванні з'єднань, що робить його більш доступним для різних промислових застосувань.

2. Виникнення внутрішніх напружень при паянні міді з графітом: При паянні міді з графітом основною проблемою є виникнення внутрішніх напружень, що обумовлені різними коефіцієнтами термічного лінійного розширення (ТКЛР) цих матеріалів. Мідь має значно вищий ТКЛР порівняно з графітом, що веде до нерівномірного розподілу температури в процесі охолодження і, як наслідок, до виникнення внутрішніх напружень. Ці напруження можуть викликати деформації та навіть руйнування з'єднання. Для зменшення цих напружень було досліджено п'ять варіантів охолодження та витримки після паяння. Використання сучасного програмного комплексу ANSYS дозволило точно змоделювати теплові та механічні процеси, що відбуваються під час охолодження, а також передбачити поведінку матеріалів при різних умовах охолодження.

3. Аналіз епюр переміщень та напружень: Аналіз епюр переміщень точок показав, що найбільш небезпечним для утворення тріщин є внутрішня поверхня втулки, де у всіх варіантах охолодження, крім варіанту 5, виникають великі розтягуючі напруження в графітовій частині. Це розтягуючі напруження можуть досягати межі міцності на вигин графіту, що робить матеріал більш схильним

					MP 8.132.6121м.02.03. ПЗ	Арк
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

до утворення тріщин і руйнування. Для зовнішньої поверхні найбільш критичними є варіанти 3 і 4, оскільки витримка після охолодження призводить до великих розтягуючих напружень, що можуть перевищити межі міцності графіту. Тому варіант 5, при якому температура знижується поступово протягом 6000 с, є оптимальним з точки зору зниження ризику утворення тріщин. У цьому варіанті розтягуючі напруження не перевищують 25 МПа, що значно знижує ймовірність виникнення тріщин порівняно з іншими варіантами. Важливо, що варіанти з швидким охолодженням і наступною витримкою недоцільні через утворення великих напружень на зовнішній поверхні графітових матеріалів.

4. Аналіз шкідливих чинників при дифузійному зварюванні та паянні: При дифузійному зварюванні та паянні металів і графітових матеріалів також існують шкідливі фактори, такі як виділення шкідливих речовин, висока температура, а також шум від механічних процесів. Для захисту зварників від впливу шкідливих речовин, що виділяються в процесі зварювання та паяння, було розроблено розрахункову систему місцевої вентиляції. Ця система дозволяє ефективно видаляти шкідливі гази та дим, що виникають під час паяння, забезпечуючи безпечні умови праці. Крім того, для зниження впливу шуму на робітників, було визначено основні джерела шуму та розроблені заходи для захисту від нього, що включають використання спеціальних захисних засобів, таких як шумозахисні огороження та навушники. Врахування цих факторів є важливим елементом у забезпеченні безпеки праці та підвищенні ефективності робочого процесу при паянні та зварюванні.

					МР 8.132.6121м.02.03. ПЗ	Арк
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список літератури

1. Паяння матеріалів: підручник / Г.В. Єрмолаєв, В.В. Квасницький, В.Ф. Квасницький та ін. // Під заг. ред. В.Ф. Хорунова і В.Ф. Квасницького. – Миколаїв: НУК, 2015. – 340 с
2. <https://www.autowelding.ru/>
3. <https://patonpublishinghouse.com/>
4. Квасницький В.В., Ермолаєв Г.В., Матвиєнко М.В. Влияние прочности и сопротивления ползучести на остаточное напряженно-деформированное состояние металлокерамических соединений // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2009. – № 3. – С. 83–92.
5. Квасницький В.В. Паяння металів. Дослідження фізико-хімічних процесів та технологічних факторів паяння [Текст] / В.В. Квасницький, В.Ф. Квасницький, Б.В. Бугасенко, Г.В. Єрмолаєв. – Миколаїв: НУК, 2006. – 160 с.
6. Стренг, Г. Теория методов конечных элементов [Текст] / Г. Стренг, Дж. Фикс. – М.: Мир, 1977. – 332с.
7. <https://ua.waykun.com/articles/pajka-grafitu-zi-staljami.php>
8. <https://www.tadviser.ru/>
9. https://ru.wikipedia.org/wiki/NX_CAE
10. <https://ru.wikipedia.org/wiki/ANSYS>
11. <https://pon.org.ua/ohorona-praci>
12. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0513-14#Text>
13. <https://stud.com.ua/>
14. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке [Текст] / В.В. Квасницький, Г.В. Ермолаєв, М.В. Матвиєнко и [др.] // Быстрозакаленные материалы и покрытия: Сб. тр. 5-й Всероссийской с междунар. участ. Научно-технич. конф. 12-13 дек. 2006 г. Научно-техн. семинар «Диффузионная сварка и ее роль в современной

					MP 8.132.6121м.02.03. ПЗ	Арк
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технике», посв. 100-летию Н.Ф. Казакова.– М.: „МАТИ” – РГТУ им. К.Э. Циолковского. – 2006. – С. 24 – 28.

15. Совершенствование технологии диффузионной сварки корпусов электромагнитных клапанов [Текст] / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко и [др.] // Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. праць. – Маріуполь: ПДТУ. – 2006, Вип. 9. – С. 178 – 183.

16. Моделирование напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке электромагнитных клапанов [Текст] / В.В. Квасницкий, М.В. Матвиенко, Ал.В. Лабарткава и др. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал Одеського національного морського ун-ту. – Одеса: ОНМУ. – 2007, №1.– С. 87 – 96.

17. Квасницький, В.В. Моделювання напружено-деформованого стану при дифузійному зварюванні матеріалів з різними фізико-механічними властивостями [Текст] / В.В. Квасницький, Г.В. Єрмолаєв, М.В. Матвієнко // Машинознавство: Всеукраїнський щомісячний науково-технічний журнал.– 2007, № 7.– С. 30 – 39.

18. Исследование напряженного состояния при пайке узлов из разнородных материалов [Текст] / К.А. Ющенко, В.Ф. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, В.Н. Марунич // Автоматическая сварка, 1987, № 5.– С. 50 – 54.

19. Анализ напряженного состояния в полученных пайкой и диффузионной сваркой узлах из разнородных материалов [Текст] / Г.В. Ермолаев, В.М. Заболотский, В.А. Игнатов, В.Ф. Квасницкий, В.Н. Марунич // Судостроительная промышленность. Сер. Сварка. – 1988. вып. 6.– С. 45 – 50.

20. R. W. Cahn, P. Haasen, E. J. Kramer (2009). *Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment: Joining of Materials*. - Wiley-VCH. – С. 143-148

					MP 8.132.6121м.02.03. ПЗ	Арк
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Анотація

Магістерська робота присвячена дослідженню особливостей з'єднання графіту з металами та аналізу напружено-деформованого стану з'єднання міді з графітом під час паяння. Актуальність роботи обумовлена широким використанням сучасних матеріалів у машинобудуванні та інших галузях промисловості, де обладнання працює в умовах високих температур, механічних навантажень та агресивних середовищ.

У роботі розглянуто властивості графітових матеріалів та переваги їх використання у поєднанні з металами. Обґрунтовано доцільність застосування паяння як ефективного способу з'єднання графіту з міддю. Основну увагу приділено дослідженню внутрішніх напружень, що виникають у з'єднанні внаслідок різниці коефіцієнтів термічного лінійного розширення матеріалів.

За допомогою програмного комплексу ANSYS проведено моделювання теплових та механічних процесів при охолодженні після паяння та проаналізовано декілька режимів охолодження. Встановлено розподіл переміщень і напружень у з'єднанні та визначено найбільш раціональний режим охолодження, який забезпечує мінімальний рівень розтягуючих напружень і знижує ймовірність утворення тріщин у графіті.

Крім того, у роботі проаналізовано шкідливі виробничі фактори, що виникають під час процесів дифузійного зварювання та паяння, і запропоновано технічні рішення щодо забезпечення безпечних умов праці, зокрема систему місцевої вентиляції та заходи захисту від шуму.

Ключові слова: графіт, мідь, паяння, з'єднання різнорідних матеріалів, внутрішні напруження, коефіцієнт термічного розширення, ANSYS, комп'ютерне моделювання, режим охолодження.

Abstract

The master's thesis is devoted to the study of the features of joining graphite with metals and the analysis of the stress-strain state of a copper-graphite joint during brazing. The relevance of the work is determined by the wide application of advanced materials in mechanical engineering and other industrial fields where equipment operates under high temperatures, mechanical loads, and aggressive environments.

The work considers the properties of graphite materials and the advantages of their use in combination with metals. The feasibility of using brazing as an effective method for joining graphite with copper is substantiated. Particular attention is paid to the study of internal stresses that arise in the joint due to the difference in the coefficients of thermal expansion of the materials.

Using the ANSYS software package, thermal and mechanical processes during cooling after brazing were simulated and several cooling regimes were analyzed. The distribution of displacements and stresses in the joint was determined, and the most rational cooling regime was identified, which provides the minimum level of tensile stresses and reduces the probability of crack formation in graphite.

In addition, the work analyzes harmful industrial factors that occur during diffusion welding and brazing processes and proposes technical solutions to ensure safe working conditions, including a local ventilation system and measures for noise protection.

Keywords: graphite, copper, brazing, dissimilar materials joining, internal stresses, coefficient of thermal expansion, ANSYS, computer modeling, cooling regime