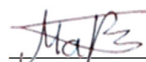


Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут
Кафедра зварювання

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

 к.т.н., доц. М.В. Матвієнко

«20» грудня 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти **«магістр»**

на тему:

**Дослідження залишкового напружено-деформованого стану паяних
циліндричних вузлів із різнорідних матеріалів методами чисельного
моделювання**

Виконав: студентка VI курсу, групи 6121зм
спеціальності 132 Матеріалознавство за
освітньо-професійною програмою Інжиніринг
зварювання та споріднених процесів

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Красота Галина Анатоліївна

(прізвище та ініціали)

Керівник Матвієнко Максим Валентинович

(прізвище та ініціали)

Рецензент Ярос Юрій Олександрович

(прізвище та ініціали)

Миколаїв - 2025 р.

Національний університет кораблебудування

імені адмірала Макарова

Херсонський навчально-науковий інститут

Факультет суднобудівний

Кафедра зварювання

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Спеціальність 132 Матеріалознавство

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма Інжиніринг зварювання та споріднених процесів

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

 Гарант освітньої програми
к.т.н., доц. М.В. Матвієнко
“ ” 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»**

студенту Красоті Галині Анатоліївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження залишкового напружено-деформованого стану паяних циліндричних вузлів із різнорідних матеріалів методами чисельного моделювання
керівник проекту Матвієнко Максим Валентинович, к.т.н., доцент

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

затверджені розпорядженням ХННІ НУК від “17” жовтня 2025 року № 20

2. Строк подання студентом проекту 13 грудня 2025р.

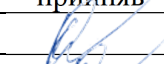
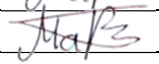
3. Вихідні дані до роботи Варіанти поєднань товщин шарів міді і графіту і ступеня витягнутості досліджуваних вузлів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз літератури відносно проблем, пов'язаних з напружено-деформованим станом та методів їх дослідження, 2. Вибір методу дослідження, 3. Результати моделювання напружено-деформованого стану, 4. Вторинна переробка мідно-графітових вузлів

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Тема роботи. 2. Мета роботи, завдання. 3. Фізична модель для дослідження. Скінчено-елементна модель. 4. Властивості матеріалів шарів. Режим навантаження. Розміри шарів міді та графіту 5. Поля радіальних напружень. 6. Поля осьових напружень. 7. Поля осьових напружень. 8. Епюри розтягуючих осьових напружень в графіті вздовж стику. 9. Епюри розтягуючих радіальних напружень вздовж верхньої поверхні шару графіту. 10. Залежність максимальних розтягуючих напружень в графіті від співвідношення товщини шарів. 11. Порівняння максимальних напружень на боковій поверхні, по стику і по торцю графітового шару при різних варіантах поєднання товщини шарів. 13. Загальні висновки

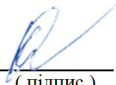
6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Матвієнко М.В., к.т.н., доцент		
2	Матвієнко М.В., к.т.н., доцент		
3	Матвієнко М.В., к.т.н., доцент		
4	Матвієнко М.В., к.т.н., доцент		

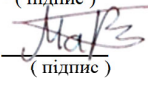
7. Дата видачі завдання 17.10.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Вступ	24.10.2025	
2.	Аналіз літератури відносно проблем, пов'язаних з напружено-деформованим станом та методів їх дослідження,	07.11.2025	
3.	Вибір методу дослідження,	17.11.2025	
4.	Результати моделювання напружено-деформованого стану,	28.11.2025	
5.	Вторинна переробка мідно-графітових вузлів	08.12.2025	
6.	Оформлення пояснювальної записки	12.12.2025	

Студент 
(підпис)

Красота Г.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) 
(підпис)

Матвієнко М.В.
(прізвище та ініціали)

Анотація

У роботі розглядається проблема формування залишкових напружень у нероз'ємних з'єднаннях, виготовлених методом паяння або дифузійного зварювання з різнорідних матеріалів, на прикладі графітно-мідних циліндричних вузлів. Актуальність теми зумовлена широким використанням таких з'єднань у енергетичному машинобудуванні, авіаційно-космічній техніці, електротехнічних системах та високотемпературних елементах обладнання. Поєднання матеріалів з істотно різними теплофізичними й механічними характеристиками закономірно призводить до появи температурних деформацій під час циклів нагрівання та охолодження, що супроводжується формуванням залишкових напружень. Саме вони визначають експлуатаційну надійність і довговічність вузла, а у критичних випадках можуть ініціювати тріщиноутворення або відшарування.

У роботі особлива увага приділяється графітно-мідним системам, де суттєва різниця коефіцієнтів лінійного теплового розширення ускладнює створення міцного з'єднання. Наведено аналіз ключових факторів, що впливають на рівень залишкових напружень: різниця КЛТР, модулі пружності, деформаційні властивості при робочих температурах, а також геометричні параметри деталей, зокрема співвідношення товщин матеріальних шарів. Показано, що максимальні розтягувальні напруження в графітовому елементі формуються на зовнішній циліндричній поверхні, на межі графіт-мідь та на торцевій поверхні. Встановлено, що найменшу небезпеку становлять конфігурації з відносно тонким графітовим шаром, тоді як значне його збільшення різко підвищує ризик руйнування.

Окремо досліджено роль пластичних деформацій міді, які здатні перерозподіляти напруження у вузлі: збільшувати їх рівень на зовнішній поверхні графіту, але водночас зменшувати небезпечні значення на межі контакту. Зазначено, що протягом охолодження зона потенційного руйнування зміщується залежно від температурного інтервалу.

Результати чисельного моделювання дозволяють сформулювати інженерні рекомендації щодо раціональних геометричних параметрів графітно-мідних вузлів з метою зменшення залишкових напружень і підвищення надійності з'єднань у практичних застосуваннях.

Ключові слова: залишкові напруження, паяння, дифузійне зварювання, різнорідні матеріали, графітно-мідні вузли, напружено-деформований стан, чисельне моделювання

Abstract

The paper examines the problem of residual stress formation in permanent joints made by brazing or diffusion welding of dissimilar materials, using graphite–copper cylindrical assemblies as an example. The relevance of the topic is driven by the wide application of such joints in power engineering, aerospace technology, electrical systems, and high-temperature equipment components. The combination of materials with significantly different thermophysical and mechanical properties naturally leads to thermal deformations during heating and cooling cycles, which are accompanied by the formation of residual stresses. These stresses determine the operational reliability and durability of the assembly and, in critical cases, may initiate cracking or delamination.

Special attention is given to graphite–copper systems, where the considerable difference in coefficients of linear thermal expansion complicates the creation of a strong joint. The paper provides an analysis of key factors affecting the level of residual stresses: differences in CLTE, elastic moduli, deformation properties at operating temperatures, as well as geometric parameters of the components, particularly the thickness ratios of the material layers. It is shown that the maximum tensile stresses in the graphite element form on the outer cylindrical surface, at the graphite–copper interface, and on the end surface. It is established that configurations with a relatively thin graphite layer pose the least risk, whereas a significant increase in its thickness sharply raises the likelihood of failure.

The role of plastic deformation of copper is examined separately. Such deformation can redistribute stresses within the assembly: increasing their level on the outer surface of the graphite while simultaneously reducing dangerous values at the contact interface. It is noted that during cooling, the potential failure zone shifts depending on the temperature interval.

The results of numerical modeling make it possible to formulate engineering recommendations regarding rational geometric parameters of graphite–copper assemblies to reduce residual stresses and improve joint reliability in practical applications.

Keywords: residual stresses, brazing, diffusion welding, dissimilar materials, graphite–copper assemblies, stress–strain state, numerical modeling

Зміст

Вступ	7
1. Аналіз літератури відносно проблем, пов'язаних з напружено-деформованим станом та методів їх дослідження	10
1.1. Область застосування вузлів з різнорідних матеріалів.....	10
1.2. Способи та проблем з'єднання вузлів з різнорідних матеріалів.....	11
1.3. Наближені методи визначення напружено-деформованого стану при паянні різнорідних матеріалів.....	14
Висновки	19
2. Вибір методу дослідження.....	22
2.1. Основи методу скінчених елементів.....	22
2.2. Сучасні програмні комплекси для моделювання напруженого стану	24
2.3. Програмний комплекс ANSYS	26
Висновки	29
3. Результати моделювання напружено-деформованого стану	33
3.1. Варіанти досліджених моделей	33
3.2. Властивості матеріалів, прийняті в розрахунках.....	35
3.3. Результати моделювання полів напружень.....	36
3.4. Залежність максимальних розтягуючих напружень від співвідношення розмірів шарів.....	57
Висновки	67
4. Вторинна переробка мідно-графітових вузлів.....	70
4.1. Доцільність вторинної переробки	70
4.2. Переробка мідного брухту	71
4.3. Переробка графіту	72
Загальні висновки	74
Література	76

Вступ

З'єднання зварних і паяних вузлів, виготовлені з різнорідних матеріалів, сьогодні широко застосовуються у багатьох галузях техніки, зокрема в енергетичному машинобудуванні, авіаційно-космічній техніці, електротехніці та високотемпературних елементах обладнання. Поєднання матеріалів, що суттєво відрізняються теплофізичними та механічними властивостями, супроводжується виникненням температурних напружень і деформацій, які здатні порушувати геометрію конструкцій, знижувати міцність з'єднань та у критичних випадках призводити до руйнування вузла.

Незважаючи на значний обсяг наукових досліджень, проблематика температурних напружень у вузлах із різнорідних матеріалів залишається недостатньо розробленою. Особливо це стосується методів точного прогнозування величин залишкових напружень після технологічних операцій нагріву та охолодження, а також критеріїв раціонального вибору геометричних параметрів з'єднання з метою мінімізації ризиків термічної втрати міцності.

Одним із характерних прикладів вузла з різнорідних матеріалів є графітно-мідне з'єднання. Такі системи поєднують високу теплопровідність і електропровідність, корозійну стійкість та здатність працювати за високих температур. Проте різниця коефіцієнтів лінійного теплового розширення (КЛТР) графіту та міді є істотною, що значно ускладнює формування якісного та надійного з'єднання. Під час охолодження після пайки або локального нагріву нерівномірне термічне стискання матеріалів призводить до появи значних залишкових напружень, здатних ініціювати тріщини або відшарування.

Для забезпечення конструкційної надійності необхідно встановити закономірності впливу геометричних параметрів деталей — товщини, діаметрів, довжини контактної зони — на величину термічних напружень у графітно-мідному вузлі. Ефективним інструментом для такого аналізу є чисельне моделювання, що забезпечує можливість відтворення температурних полів, деформацій і напружень у тривимірній постановці з урахуванням реальних матеріальних характеристик та умов теплообміну.

Метою даної роботи є визначення, на основі методів комп'ютерного моделювання, закономірностей впливу геометричних розмірів деталей на напружено-деформований стан графітно-мідного з'єднання, а також формування інженерних рекомендацій щодо зменшення залишкових напружень і підвищення експлуатаційної надійності вузла.

					МР 8.132.6121зм.01.04.01 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Красота Г.А.				Аналіз літератури відносно проблем, пов'язаних з напружено-деформованим станом та методів їх дослідження	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірює	Матвієнко М.В.						9	
Рецензент						ХННІ НУК		
Н. Контр.	Матвієнко М.В.							
Зав. каф.	Матвієнко М.В.							

1. Аналіз літератури відносно проблем, пов'язаних з напружено-деформованим станом та методів їх дослідження

1.1. Область застосування вузлів з різнорідних матеріалів

Необхідність створення з'єднань різнорідних металів виникає під час виробництва широкого спектра промислових виробів і конструкцій. Такі вузли застосовуються у хімічному машинобудуванні, авіаційній та ракетно-космічній техніці, суднобудуванні, будівельній індустрії, електротехніці, приладобудуванні, транспортній галузі, під час електролізу кольорових металів, а також під час виготовлення споживчих товарів і в багатьох інших секторах [1], [2].

Історично, для поєднання різнорідних матеріалів використовувалися різьбові, клепані або фланцеві з'єднання. Однак розвиток технологій зварювання дозволив значно підвищити ефективність таких сполук, зменшити трудомісткість і металоємність, а також забезпечити кращі експлуатаційні властивості конструкцій [3]. Зварювання стало фактично незамінним у галузях, де потрібні герметичні, міцні та легкі з'єднання — наприклад, під час виготовлення вакуумних систем із різнорідних металів для криогенної техніки, у реакторному та ракетобудуванні [4].

Застосування комбінованих зварних вузлів на основі різнорідних матеріалів також відкрило можливість створювати нові типи конструкцій, що раніше не могли бути реалізовані через обмеження традиційних методів з'єднання [5].

Одним із характерних прикладів промислового застосування технологій зварювання різнорідних металів є з'єднання міді та сталі у фурмах кисневого дуття. У таких конструкціях необхідно зварювати мідні елементи товщиною 6–10 мм зі сталевими деталями товщиною 3,5–4 мм, забезпечуючи при цьому надійність, герметичність та стійкість до термічних навантажень [6].

Значного поширення технології зварювання різнорідних металів набули у суднобудуванні, де широко застосовуються алюмінієві сплави. Незважаючи на те, що алюмінієві сплави є дорожчими за сталь, їх використання у надбудовах суден забезпечує суттєві переваги: зменшення маси конструкції, немагнітність, підвищена корозійна стійкість і висока питома міцність [7]. Технологія зварювання

алюмінієвих сплавів зі сталлю із використанням перехідних біметалічних вставок Al–steel дозволяє надійно з'єднувати легкі надбудови зі сталевими корпусами суден [8].

У кріогенній техніці широко використовуються складні системи трубопроводів з різнорідних металів, що працюють в умовах низьких температур і високої герметичності. Зокрема, це стосується зварювання сталєалюмінієвих перехідників у кисневих регенераторах, які застосовуються в металургійній та хімічній промисловості [9].

В електротехнічній галузі спостерігається стійке збільшення використання алюмінію як провідникового матеріалу, що вимагає ефективних методів з'єднання його з міддю. Одним із таких методів є холодне стикове зварювання, яке активно застосовується під час виготовлення мідно-алюмінієвих трансформаторних відводів круглого перерізу. З'єднання, отримані холодним стиковим зварюванням, відрізняються високою вібраційною стійкістю, а їхній тимчасовий опір часто перевищує опір вихідного алюмінію [10, 11].

Завдяки своїм перевагам — можливості поєднання матеріалів із принципово різними фізико-механічними та електрохімічними властивостями — технології зварювання різнорідних металів продовжують активно розвиватися та знаходять нові сфери застосування у високотехнологічних галузях.

1.2. Способи та проблем з'єднання вузлів з різнорідних матеріалів

Створення працездатних зварних конструкцій із різнорідних металів і сплавів пов'язане з низкою технологічних труднощів, що зумовлені відмінностями теплофізичних та механічних властивостей, формуванням хімічної й структурної неоднорідності, а також появою значних напружень і деформацій під час зварювання [12]. У зв'язку з цим забезпечення стабільної якості таких з'єднань потребує високої культури виробництва, суворого дотримання технологічних регламентів, а також жорсткої системи контролю, яка має бути більш вимогливою, ніж при зварюванні однорідних металів [13].

З'єднання різнорідних металів у твердому стані

Основні способи зварювання тиском включають холодне, пресове, тертям, дифузійне, ультразвукове, вибухом, опором, магнітно-імпульсне та ін. Вони відрізняються лише режимами тиску та температури, а також тим, чи здійснюється підігрів заготовок до або під час процесу. У більшості технологій основними керованими параметрами є тиск, температура та тривалість впливу [14]. Оскільки плавлення майже не відбувається (виняток — зварювання опором), з'єднання формується на поверхні твердого тіла, що мінімізує ризик утворення крихких інтерметалідів — одного з головних недоліків зварювання плавленням [15].

Холодне зварювання

Холодне зварювання забезпечує з'єднання однорідних та різнорідних металів при температурах нижче рекристалізації завдяки пластичній деформації [16]. Воно особливо ефективне для металів, схильних до утворення інтерметалідів або чутливих до нагріву. Спочатку технологія застосовувалась переважно для сполучень Al–Cu, проте сучасні модифікації дозволили розширити спектр матеріалів [17].

Зварювання тертям

Зварювання тертям здійснюється шляхом притиснення деталей з одночасним зсувним тертям, при якому теплота генерується без зовнішнього джерела [18]. Це забезпечує високоякісне з'єднання різнорідних металів, включно з парами, що утворюють інтерметалідні фази. Обмеженням є вимога до форми деталей: одна зі зварюваних частин має бути круглою або трубчастою.

Дифузійне зварювання

При дифузійному зварюванні деталі стискаються під тиском і витримуються при температурі нижче точки плавлення, що сприяє міжатомній дифузії [19]. Цей спосіб забезпечує якісне з'єднання без утворення тріщин, пористості та крихких включень, що робить його ефективним для різнорідних матеріалів [20].

Ударне конденсаторне зварювання

Цей метод характеризується надшвидким нагрівом та мінімальною зоною термічного впливу, що робить його придатним для металів, схильних до утворення евтектиків [21].

Ударне зварювання у вакуумі

Метод передбачає одноразовий ударний імпульс при швидкості ударника до 20 м/с. Завдяки надкороткому часу процесу досягається якісне з'єднання металів із низькою взаємною розчинністю, наприклад Nb–steel [22].

Ультразвукове зварювання

Ультразвукове зварювання формує з'єднання за рахунок високочастотних коливань та тиску, що забезпечує пластичну деформацію та руйнування оксидних плівок [23]. Метод дозволяє якісно з'єднувати тонкі матеріали та метали з різними властивостями.

Зварювання вибухом

Зварювання вибухом — один з найбільш ефективних способів отримання міцних з'єднань різнорідних металів. Оскільки процес відбувається при кімнатній температурі, утворення інтерметалідів мінімальне, а міцність — найвища серед методів твердого стану [24]. Технологія широко застосовується для виготовлення біметалевих листів і перехідних вставок.

Контактне зварювання

Точкове та одностороннє контактне зварювання застосовується для дрібних провідників і тонких плівок. Сучасні технології передбачають використання розщеплених електродів, імпульсного нагрівання та мікрозварювання для електронної промисловості [25].

Магнітно-імпульсне зварювання

Магнітно-імпульсне зварювання базується на високошвидкісній деформації металу внаслідок електромагнітних сил. Під час зварювання труб Al–steel швидкість зіткнення може досягати 200–300 м/с, що забезпечує надійне з'єднання без інтерметалідів [26].

Зварювання плавленням та наплавлення різнорідних металів

При дуговому та плазмовому зварюванні різнорідних металів формування зварної ванни супроводжується інтенсивним перемішуванням основного та присадкового металів, що може призвести до небажано високої частки основного металу у шві [27]. Наприклад, при наплавленні бронзи на сталь частка Fe у першому шарі може досягати 50–60 %.

Це ускладнює досягнення необхідних властивостей шва, тому з'єднання вимагають застосування багат шарової наплавки або джерел теплоти, що забезпечують мінімальне проплавлення основного металу [28].

Джерела теплоти першої та другої групи

Джерела теплоти прямої дії (дуга між електродом і виробом) складніше контролювати через жорсткий зв'язок між плавленням електродного й основного металів. Джерела непрямої дії — двоелектродна дуга, трифазна дуга, струмінь перегрітого металу — дають змогу роздільно регулювати тепловкладення та зменшувати змішування металів [29].

Наплавлення струменем перегрітого металу

Метод полягає у попередньому плавленні присадкового металу в окремому тиглі й подальшому перенесенні струменю на поверхню виробу. Це мінімізує проплавлення основного металу, однак застосування спеціальної плавильної оснастки обмежує промислове використання [30].

Дугове наплавлення з плаваючою дугою

Створення дуги між двома електродами (один плавкий) дозволяє отримати ефект, подібний до струменевого наплавлення: основний метал нагрівається перегрітим рідким присадковим металом без електричного контакту дуги з виробом [31]. Це забезпечує мінімальне перемішування металів і підвищує якість з'єднань.

1.3. Наближені методи визначення напружено-деформованого стану при паянні різнорідних матеріалів

Власними (або внутрішніми) напруженнями називають напруження, що існують у матеріалі за відсутності будь-яких зовнішніх навантажень. Їх формування пов'язане з термічними, структурними, фазовими та механічними процесами, що виникають у матеріалі під час його обробки, з'єднання або експлуатації [32, 33]. Залежно від об'єму, у межах якого вони врівноважуються, залишкові напруження поділяються на три основні групи:

напруження першого роду, що врівноважуються в масштабі всього виробу;

напруження другого роду, які врівноважуються в межах окремих зерен або їх кластерів;

напруження третього роду, що виникають на рівні кристалічної ґратки та окремих фазових включень [34, 35].

Методи визначення цих напружень різняться: напруження першого роду розраховують із застосуванням основ опору матеріалів, теорії пружності та пластичності, а також за допомогою механічних експериментальних методів; напруження другого і третього роду знаходять переважно за даними рентгеноструктурного аналізу та мікродифракційних досліджень [36, 37].

Залежно від орієнтації у просторі власні напруження можуть бути одноосними, двовісними або трьохвісними. Важливою їх властивістю є те, що вони утворюють взаємно врівноважену систему сил, тобто їх сума у матеріалі дорівнює нулю, навіть якщо локальні значення можуть бути дуже високими [38].

Власні напруження в паяних конструкціях

У паяних конструкціях залишкові напруження формуються як у результаті операцій попереднього виготовлення деталей (механічної обробки, термічних впливів), так і безпосередньо під час процесу пайки. Зокрема, вони можуть виникнути через:

- нерівномірність локального нагріву у зоні шва;
- відмінності в структурних і фазових перетвореннях у матеріалах;
- неоднакові температурні коефіцієнти лінійного розширення матеріалів;
- відмінності модулів пружності та товщин елементів;
- теплову асиметрію у процесі охолодження [32, 39].

Найвищі рівні власних напружень спостерігаються при пайці конструкцій із різнорідних матеріалів, де різниця їх фізико-механічних властивостей є суттєвою. Такі матеріальні комбінації, як твердий сплав–сталь, мідь–сталь чи алюміній–сталь, демонструють значні градієнти деформацій під час охолодження через різні коефіцієнти температурного розширення [40, 41]. Для таких сполук температурні напруження можуть досягати або навіть перевищувати межу плинності одного з матеріалів, що суттєво впливає на надійність вузла [42].

Проблема ще більше ускладнюється при пайці металів з неметалами — склом, керамікою, графітом, напівпровідниками. В подібних системах різниця в ТКЛР є максимальною, тому термічні напруження становлять головний фактор, що визначає працездатність та довговічність з'єднання [43].

Температурна причина виникнення власних напружень

Основним чинником утворення температурних залишкових напружень є різниця в температурних коефіцієнтах лінійного розширення (ТКЛР) матеріалів, що з'єднуються. Під час охолодження після пайки кожен матеріал прагне до власної величини лінійної усадки. Оскільки елементи конструкції жорстко пов'язані швом, виникає система взаємних зусиль стискання та розтягу: матеріал з більшим ТКЛР прагне більшої усадки, але обмежується жорсткістю іншого; матеріал з меншим ТКЛР вимушено розтягується, створюючи небажані внутрішні напруження.

Таким чином, температурні напруження є прямим наслідком різниці у деформаційних відповідях матеріалів у процесі охолодження. Вони відіграють визначальну роль у працездатності паяних вузлів, особливо різнорідних.

Таблиця 1.1 Температурні коефіцієнти лінійного розширення металів

Метал	Хімічне позначення	Значення α при 30 – 100°C, $10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$
Алюміній	Al	23,1
Вольфрам	W	4,4
Залізо	Fe	11,5
Кадмій	Cd	31,0
Кремній	Si	6,0
Кобальт	Co	12,5
Магній	Mg	26,1
Марганець	Mn	22,0
Молібден	Mo	5,3
Мідь	Cu	16,5
Нікель	Ni	13,5
Олово	Sn	22,5
Свинець	Pb	28,1
Срібло	Ag	18,7
Цинк	Zn	39,5
Хром	Cr	8,4

Значення температурних коефіцієнтів лінійного розширення металів, що застосовуються в паяних конструкціях, наведені в табл. 1. Температурні коефіцієнти лінійного розширення сплавів, як правило, близькі до значень коефіцієнтів лінійного розширення основних компонентів сплаву, що узгоджується з відомими закономірностями термофізичної поведінки конструкційних матеріалів [44, 45]. Наприклад, для алюмінієвих сплавів АМц $\alpha = 23,3 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ і АМг $\alpha = 23,6 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$. Температурні коефіцієнти лінійного розширення низьковуглецевих сталей мало відрізняються від коефіцієнта лінійного розширення заліза, тоді як для найбільш розповсюдженої нержавіючої сталі 12Х18Н9Т $\alpha = 14,9 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, що узгоджується з даними досліджень у галузі металургії та з'єднання неоднорідних матеріалів [46, 47].

У загальному випадку під час пайки здійснюють з'єднання елементів, які мають різні фізико-механічні властивості, включаючи модуль пружності, коефіцієнт температурного розширення та площу поперечного перерізу. Модуль пружності елемента 1 позначимо E_1 , площу поперечного перерізу — F_1 , коефіцієнт температурного розширення — α_1 ; для елемента 2 відповідно E_2, F_2, α_2 . Температуру початку утворення пружно-пластичних деформацій позначимо через T_1 для елемента 1 та T_2 для елемента 2. Значення T_1 і T_2 є умовними величинами, що визначаються з урахуванням термомеханічної поведінки матеріалів і застосовуються при описі напружено-деформованого стану з'єднань [44, 48, 49].

У паяних конструкціях, так само як і у зварних, можливе утворення залишкових деформацій, що призводять до поздовжніх і поперечних усадок, скорочення елементів або деформацій згину, які супроводжуються викривленням конструктивних елементів. У більшості випадків деформації під час пайки є меншими за величиною порівняно зі зварюванням, однак при пайці різнорідних матеріалів вони можуть бути значними, що підтверджується численними дослідженнями щодо поведінки різнорідних металів при нагріванні та охолодженні [44 - 46].

У паяних деталях, виготовлених із матеріалів з різними фізико-механічними характеристиками, усунення власних напружень традиційними методами, такими як високотемпературний відпуск, є неможливим. При охолодженні та

нерівномірному перебігу деформацій у матеріалах із різною пластичністю та теплопровідністю неминуче накопичуються пружно-пластичні деформації, які формують внутрішні (залишкові) напруження [44, 47, 48].

Зниження залишкових напружень у випадку поєднання деталей із суттєво різними коефіцієнтами лінійного розширення (наприклад, пластини з твердого сплаву та сталевих корпусу) досягається двома основними способами:

- застосуванням припоїв із низькою температурою плавлення;
- збільшенням товщини паяного шва [45, 49].

Використання легкоплавких срібних припоїв зменшує відносні деформації при охолодженні, а отже — й рівень залишкових напружень. Проте недоліком цього методу є зниження теплостійкості інструменту та висока вартість таких припоїв [50]. Збільшення товщини шва призводить до перерозподілу власних напружень на більший об'єм матеріалу та зменшення їх пікових значень. Водночас надмірне збільшення зазору знижує міцність з'єднання, тому застосовують компенсаційні прокладки зі сталі, міді, нікелю або залізо-нікелевих сплавів, що відповідає рекомендаціям із формування з'єднань різнорідних матеріалів [46, 51].

Експериментальні дослідження залишкових напружень у паяних конструкціях проводилися, зокрема, на зразках зі сталі Ст3. На пластинках розмірами 400×120×10 мм виконували напайки вздовж осі та по кромках, а для порівняння — ручне дугове зварювання. Пайка здійснювалася газовими пальниками із застосуванням припою Л62. Результати показали, що в зоні пайки та наплавлення формуються значні власні напруження (близько 15 кгс/мм²), які різко зменшуються зі збільшенням відстані від шва та навіть змінюють знак. На протилежному боці пластини спостерігаються напруження розтягнення, що підтверджує складний характер НДС у подібних з'єднаннях [44, 46, 52].

Величина власних напружень, викликаних пайкою, змінюється в широкому діапазоні й залежить від співвідношення коефіцієнтів лінійного розширення та теплопровідності з'єднуваних матеріалів. У певних випадках напруження досягають границі плинності металу шва [53].

Залишкові напруження спричиняють деформації усадки, аналогічні тим, що виникають у зварних конструкціях. Дослідження деформацій у паяних і зварних

швах на пластинах СтЗ показало, що в зоні пайки виникає вкорочення волокон, яке становить 40–60% від величини усадки при ручному дуговому зварюванні. Це пояснюється більш рівномірним розподілом температури під час пайки, що зменшує зону пластичних деформацій і, відповідно, рівень залишкових напружень [54].

Величина залишкових деформацій у паяних конструкціях значною мірою залежить від співвідношення фізико-механічних властивостей основного металу й припою. Навіть при пайці низьковуглецевих і низьколегованих сталей у зоні швів виникають залишкові напруження розтягнення, що призводить до деформацій укорочення та вигину, як і у випадку зварювання [55].

При пайці у печах та соляних ваннах нагрів і охолодження конструкції відбуваються набагато рівномірніше, ніж при локальному нагріванні пальником. Унаслідок цього величини залишкових напружень і деформацій значно менші [47, 6]. Локальні залишкові деформації в конструкціях можуть виникати й при стикових, нахлесткових або таврових з'єднаннях, особливо у виробах малої товщини, що зазнають нерівномірного нагрівання [46, 48].

Висновки

Існує значна кількість технологій з'єднання різнорідних матеріалів, проте для більшості з них характерною є спільна проблема — виникнення напружень та деформацій, спричинених істотною різницею в теплофізичних і механічних властивостях цих матеріалів. Аналітичні методи розрахунку дозволяють оцінити інтенсивність напружень у спрощених умовах, однак з інженерної точки зору їх застосування є обмеженим. Це пов'язано з тим, що аналітичні моделі базуються на ряді припущень, які не дають можливості відтворити реальні складні поля напружень у з'єднаннях різнорідних матеріалів.

У зв'язку з цим у даній роботі як основний інструмент використано чисельне комп'ютерне моделювання, яке дає змогу врахувати реальні геометричні,

теплофізичні та механічні характеристики матеріалів і отримати детальну картину напружено-деформованого стану з'єднання.

Метою роботи є визначення впливу геометричних параметрів деталей на формування залишкових напружень у графітно-мідному з'єднанні, а також розроблення рекомендацій щодо їх мінімізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Обґрунтувати метод дослідження та вибрати програмний комплекс для чисельного моделювання.
2. Розробити фізичну модель та побудувати скінчено-елементну модель з'єднання.
3. Визначити варіанти вихідних даних, що підлягатимуть аналізу.
4. Провести моделювання вузлів, виготовлених із різнорідних матеріалів.
5. Виконати аналіз розподілу та величин залишкових напружень, отриманих у результаті моделювання.
6. Сформулювати рекомендації щодо оптимального проєктування паяних вузлів із матеріалів із суттєво різними властивостями для зменшення залишкових напружень.

					МР 8.132.6121зм.01.04.02 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Вибір методу дослідження	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив	Красота Г.А.						21	
Перевірів	Матвієнко М.В.							
Рецензент						ХННІ НУК		
Н. Контр.	Матвієнко М.В.							
Зав. каф.	Матвієнко М.В.							

2. Вибір методу дослідження

2.1. Основи методу скінчених елементів

Одним із найефективніших сучасних методів чисельного розв'язання інженерних задач із використанням ЕОМ є метод скінчених елементів (МСЕ). Ідея представлення суцільного середовища у вигляді системи елементів скінчених розмірів була запропонована ще на початку XIX ст. С. Пуассоном та стала фундаментом для подальшого розвитку дискретизаційних методів [56]. Еволюція МСЕ відбувалася у двох основних напрямках: як узагальнення варіаційно-різницевих підходів до розв'язання задач математичної фізики, а також як розвиток методів будівельної механіки стрижневих систем, зокрема методу переміщень [57, 58].

Початок систематичного формування МСЕ був закладений у працях Р. Куранта, МакГенрі, А. Хреннікова у 1940-х роках. Однією з перших фундаментальних публікацій у цій галузі стала робота М. Дж. Тернера, Р. Клафа, Г. Мартіна та Л. Топпа (1956 р.). Сам термін «finite element» уперше був використаний Р. Клафом у 1960 році [59]. Швидкий розвиток методу у другій половині XX ст. був зумовлений появою високопродуктивних обчислювальних машин і потребами аерокосмічної галузі [58, 60].

Сьогодні кількість праць, присвячених МСЕ, обчислюється тисячами. Основи теорії та застосування МСЕ до задач пружності, пластичності, теплопровідності, динаміки та механіки конструкцій розкрито в класичних монографіях О. Зенкевича, Дж. Одена, Г. Стренга, Д. Фікса, Л. Сегерлінда та інших авторів, роботи яких мають фундаментальний характер і широко застосовуються у світовій практиці [56, 57, 61].

Сутність методу полягає у заміні суцільного середовища з нескінченним числом ступенів свободи системою підобластей — скінчених елементів, кожен з яких має кінцеве число вузлових ступенів свободи. У середині кожного елемента шукані величини (переміщення, деформації, напруження тощо) апроксимуються функціями форми через вузлові значення, а розподілені навантаження замінюються еквівалентними вузовими силами. У математиці це відповідає переходу від

диференціальних рівнянь до системи алгебраїчних рівнянь, розв'язок яких визначає поля переміщень у вузлах конструкції [59, 61].

МСЕ отримав надзвичайно широке застосування у практиці розрахунків на міцність, стійкість і коливання будівельних, машинобудівних, авіаційних та інших конструкцій. З його допомогою успішно аналізують стрижневі системи (рами, ферми), тонкостінні конструкції (плити, оболонки), просторові масиви та комбіновані системи з елементів різної розмірності [57, 62].

Метод відзначається універсальністю, можливістю врахування фізичної та геометричної нелінійності, ортотропії матеріалів, складних граничних умов, а також інваріантністю щодо геометрії конструкції. Важливою перевагою є можливість повної автоматизації всіх етапів розрахунку [61, 62].

На основі кінцево-елементної технології створено потужні програмні комплекси, серед яких ABAQUS, ADINA, ANSYS, MSC/NASTRAN, COMSOL, а також низка систем, розроблених для будівельної механіки. Ці програми підтримують широкий набір типів елементів та враховують значну кількість факторів: нелінійність, контакт, термічні навантаження, динаміку, релаксацію напружень тощо [60, 62].

Незважаючи на універсальність, МСЕ, за висловом Р. Галлагера, «не є кінцевим етапом розвитку чисельних методів, а радше однією з багатьох сходинок їх еволюції» [58].

Найбільшого поширення набув варіант МСЕ у переміщеннях, коли вузлові переміщення є шуканими невідомими системи. Реалізація методу включає такі основні етапи:

1. Ідеалізація області. Конструкцію розбивають на скінченні елементи, що з'єднані у вузлових точках.
2. Вибір інтерполяційних функцій. Кусочно-поліноміальні функції забезпечують апроксимацію переміщень та їх похідних у межах елемента.
3. Виведення геометричних та фізичних співвідношень. Встановлюються залежності між переміщеннями, деформаціями та напруженнями.
4. Формування матриці жорсткості елемента. Використовується принцип можливих переміщень або принцип мінімуму потенційної енергії.

5. Збирання глобальної матриці жорсткості та задання граничних умов. Результатом є система лінійних алгебраїчних рівнянь.

6. Розв'язання системи рівнянь. Застосовують прямі або ітераційні методи з урахуванням структури матриць.

7. Обчислення деформацій і напружень. Виконується з використанням отриманих вузлових переміщень.

2.2. Сучасні програмні комплекси для моделювання напруженого стану

NX Nastran — один із найпоширеніших інструментів для комп'ютерного інженерного аналізу методом скінченних елементів (МСЕ), розроблений компанією Siemens PLM Software. Він дає можливість вирішувати широкий спектр задач: статичні, динамічні, лінійні, нелінійні та теплові. Історично NASTRAN був створений у 1960–1970-х роках за замовленням NASA у рамках програми космічних запусків і став першим універсальним інструментом структурного аналізу [63].

Сучасний NX Nastran підтримує розрахунки напружено-деформованого стану, визначення власних частот і форм коливань, аналіз стійкості, задачі теплопровідності, динамічні перехідні процеси та задачі випадкових навантажень. Він інтегрується з препроцесорами NX і Femap, а також може працювати автономно, включаючи використання на обчислювальних кластерах [64]. Комплекс широко застосовується в авіабудуванні, автомобілебудуванні, енергетиці, суднобудуванні та машинобудуванні [64].

Одним із найбільш продуктивних рішень на ринку нелінійного динамічного аналізу є LS-DYNA, створена компанією Livermore Software Technology Corporation. Вона базується на явній формулі МСЕ та орієнтована на аналіз високоінтенсивних процесів: ударів, вибухів, руйнування, формозміни та контактних взаємодій [65]. Програма включає понад 100 моделей матеріалів, 25 моделей контакту, підтримує великі деформації, поширення тріщин, моделювання багатофазних процесів та мультифізичний аналіз. LS-DYNA широко використовується для краш-тестів, моделювання вибухів, ударного навантаження, листового штампування та біомеханічних задач [65].

ADAMS (MSC Software) є провідним інструментом для моделювання механічних систем із багатьма ступенями свободи. Він дозволяє створювати моделі механізмів, оцінювати кінематику, динаміку, чутливість параметрів, а також оптимізувати конструкцію. Система активно застосовується у транспортному машинобудуванні, робототехніці, авіабудуванні, суднобудуванні та біомеханіці [66]. ADAMS підтримує інтеграцію з CAD-системами та експортує дані у CAE-пакети.

Для задач обчислювальної гідродинаміки широко використовують STAR-CD, який став одним із перших пакетів із підтримкою ковзних сіток та ефективним паралельним алгоритмом методу кінцевих об'ємів [67]. STAR-CD дозволяє моделювати ламінарні й турбулентні потоки, тепло- і масоперенесення, хімічні реакції, горіння, багатофазні та багатокомпонентні процеси. Інструмент використовується для аналізу двигунів, турбомашин, теплообмінників, систем вентиляції та охолодження.

Pro/Engineer (тепер PTC Creo) має вбудовані модулі MCE: Pro/MESH, Pro/FEM-POST, Pro/SURFACE, що забезпечують побудову скінченно-елементних сіток, аналіз результатів та роботу зі складною геометрією. Pro/MESH дозволяє формувати оболонкові й об'ємні елементи, задавати граничні умови, контактні взаємодії та експортувати моделі в стандартизовані формати (NASTRAN, PATRAN, ANSYS) [68]. Pro/FEM-POST забезпечує повний цикл постобробки, а Pro/SURFACE використовується для побудови високоточних аеродинамічних та складнопрофільних поверхонь.

Серед універсальних рішень для багатфункціонального чисельного моделювання особливо виділяється ABAQUS, що містить два вирішувачі: ABAQUS/Standard (неявний MCE) та ABAQUS/Explicit (явний MCE). Вони дозволяють комбінувати різні типи аналізу: статичний, динамічний, контактний, термомеханічний, квазістатичний та вібраційний [69]. У ABAQUS підтримуються складні моделі матеріалів, геометрична та фізична нелінійність, а також передача результатів між Standard і Explicit, що є ключовим під час моделювання складних технологічних процесів — штампування, навантаження-розвантаження, удару та розповсюдження хвиль.

Таким чином, сучасні CAE-системи забезпечують можливість моделювати майже будь-який фізико-механічний процес, включаючи НДС, краш-аналіз, теплопередачу, гідродинаміку, контактну взаємодію, деформацію та руйнування. Використання цих інструментів значно підвищує точність інженерних розрахунків, скорочує витрати на фізичні експерименти та дозволяє оптимізувати конструкції на етапі проектування.

2.3. Програмний комплекс ANSYS

ANSYS є однією з найпоширеніших універсальних систем скінченно-елементного аналізу (MCE), що відіграє ключову роль в інженерній практиці вже понад три десятиліття. Вона призначена для моделювання широкого спектра задач: механіки деформівного твердого тіла, динаміки конструкцій, задач теплопередачі, гідрогазодинаміки, електромагнетизму, акустики та багатофізичних процесів, які потребують одночасного урахування декількох фізичних полів [70]. Завдяки використанню єдиного ядра геометричного моделювання Parasolid система забезпечує високу точність опису складної геометрії та підтримує інтеграцію з провідними CAD-комплексами [71].

ANSYS розробляється компанією **ANSYS Inc.**, яка також створила ряд спеціалізованих продуктів, зокрема DesignSpace, ICEM CFD та інші засоби для задач, що потребують високої точності опису геометрії й потоків. Інтеграція з популярними CAD-системами, такими як **Unigraphics, CATIA, Pro/ENGINEER, SolidWorks, Autodesk Inventor**, забезпечує безперервний цикл «CAD → CAE → оптимізація» з мінімальними втратами даних [72]. Двосторонній обмін інформацією дозволяє ефективно налаштовувати моделі, оновлювати геометрію та адаптувати сітку в процесі проектування.

Система має широке промислове застосування: вона використовується у компаніях **BMW, Boeing, Caterpillar, Exxon, Ford, General Electric, Mitsubishi, Siemens**, а також у військово-промисловому комплексі та провідних науково-дослідних центрах [73]. Наявність сертифікації відповідно до міжнародних

стандартів **ISO 9000 / ISO 9001** свідчить про відповідність програмного забезпечення високим вимогам інженерної галузі.

Історія формування програмного комплексу

Перші версії ANSYS були орієнтовані на стаціонарні задачі теплопровідності та лінійної міцності. Як і більшість програм того часу, вони функціонували у пакетному режимі й вимагали суперкомп'ютерів для проведення розрахунків. Протягом 1970-х років у зв'язку з появою нових обчислювальних систем та зростанням вимог користувачів було здійснено значну кількість модифікацій. Зокрема, з'явилась підтримка фізичних нелінійностей, була розширена бібліотека кінцевих елементів та реалізовано метод підконструкцій [70].

Наприкінці 1970-х важливою віхою стало запровадження інтерактивного режиму роботи, що кардинально спростило побудову скінченно-елементних моделей. Інтерактивна графіка дала можливість візуально перевіряти геометрію, сітку, матеріальні властивості та граничні умови до початку розрахунку. Окрім цього, з'явилась можливість миттєвого перегляду результатів аналізу після завершення ітераційного процесу [71].

Унікальні особливості платформи ANSYS

1. Найширше фізичне охоплення серед MCE-програм

ANSYS — одна з небагатьох універсальних CAE-систем, яка підтримує аналіз:

- міцності;
- теплопровідності та конвекції;
- гідро- та газодинаміки;
- електромагнітних полів;
- акустичних коливань;
- пов'язаних задач із взаємодією фізичних процесів [74].

Це робить її ключовим інструментом у багатofізичних задачах, коли змінюються температура, напруження, електромагнітні поля або потоки рідини.

2. Інтеграція з CAD/CAE/CAM-системами

ANSYS забезпечує взаємодію з більшістю сучасних платформ автоматизованого проєктування. Геометричні моделі при імпорті переводяться у

внутрішній формат, що дозволяє користувачеві модифікувати об'єкт, контролювати ступінь деталізації, видаляти незначні елементи та уточнювати сітку без обмежень [72].

3. Відкритість і модифікованість

У систему інтегровано скриптову мову **APDL**, яка дозволяє будувати параметричні моделі, автоматизувати обчислення, створювати макроси, змінювати алгоритми й керувати процесом розрахунку. Це забезпечує можливість адаптації ANSYS до специфічних задач підприємства [75].

4. Потужна система довідки

Система **HELP** у ANSYS базується на гіпертекстових структурах і містить тисячі прикладів, алгоритмів, описів елементів і команд. Вона є однією з найповніших серед усіх CAE-комплексів [76].

Препроцесор ANSYS

Препроцесор дозволяє створювати моделі «з нуля» або імпортувати їх з CAD-середовищ. На відміну від багатьох інших систем, ANSYS не обмежує редагування геометрії після створення сітки. Користувач може:

- змінювати геометрію та параметри моделі;
- уточнювати або розріджувати сітку;
- видаляти дрібні елементи, що ускладнюють генерацію сітки;
- будувати поверхні, тверді та каркасні моделі;
- налаштовувати контактні взаємодії [73].

Програма підтримує складні типи елементів:

- оболонкові, твердотільні, балкові;
- теплові;
- електромагнітні;
- елементи із температурними та електричними ступенями свободи.

Багатофізичні задачі в ANSYS

Система дозволяє моделювати задачі, що включають одночасну дію механічних, теплових, електромагнітних та потокових процесів. Серед них:

- термомеханічні напруження;
- гідродинамічний тиск та деформація конструкцій;

- індукційний нагрів;
- електромагнітні сили;
- акустичні коливання у взаємодії зі структурами;
- моделювання втоми та поширення тріщин [74, 76].

Наявність спеціалізованих елементів дає можливість автоматично переходити від одного типу фізичного поля до іншого, що є основою для аналізу складних технологічних процесів.

Застосування ANSYS у промисловості

ANSYS використовується для розв'язання:

- задач міцності корпусних конструкцій;
- аналізу турбомашин та обертальних систем;
- розрахунків двигунів внутрішнього згоряння;
- високошвидкісних та ударних процесів;
- акустичних хвиль у компресорах та турбінах;
- процесів теплового впливу в електроніці;
- оптимізації деталей автомобільних і авіаційних конструкцій [73].

У багатьох галузях ANSYS дозволив суттєво скоротити дорогі цикли «проекування — виготовлення — випробування», замінюючи фізичні експерименти віртуальними.

Висновки

Сучасна інженерна практика широко застосовує метод скінченних елементів, оскільки він дає змогу розв'язувати практично будь-які задачі механіки деформівного твердого тіла, теплопровідності, гідрогазодинаміки, електромагнетизму та інших фізичних полів у прийнятний час і з високою точністю. Ефективність використання цього методу значною мірою визначається рівнем автоматизації окремих етапів розрахунку, що забезпечується спеціалізованими програмними комплексами.

Повноцінна CAE-система повинна включати три основні модулі:

препроцесор, що забезпечує побудову геометричної моделі, формування сітки скінченних елементів, вибір матеріальних моделей і задання граничних та початкових умов;

розрахунковий модуль, який реалізує чисельне розв'язання поставленої задачі;

постпроцесор, призначений для аналізу, візуалізації та інтерпретації отриманих результатів.

Одним із найпотужніших і найпоширеніших програмних комплексів, що відповідає вказаним вимогам, є ANSYS, який застосовується в академічних дослідженнях, машинобудуванні, авіаційній та енергетичній галузях, електроніці й багатьох інших сферах. ANSYS забезпечує широкий вибір типів елементів, підтримує лінійний і нелінійний аналіз, дозволяє моделювати контактні взаємодії, роботу конструкцій при різних видах навантажень та впливів середовища.

Для розв'язання задач, поставлених у даній роботі, функціональних можливостей ANSYS більш ніж достатньо. Комплекс дає можливість повністю реалізувати процедуру моделювання — від побудови геометрії та сітки до аналізу напружено-деформованого стану, оцінки локальних концентрацій напружень та формування кінцевих рекомендацій щодо оптимізації конструкції.

					МР 8.132.6121зм.01.04.03 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Красота Г.А.				Результати моделювання напружено- деформованого стану	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірів	Матвієнко М.В.						31	
Рецензент						ХННІ НУК		
Н. Контр.	Матвієнко М.В.							
Зав. каф.	Матвієнко М.В.							

3. Результати моделювання напружено-деформованого стану

3.1. Варіанти досліджених моделей

Однією з проблем отримання за допомогою пайки якісних з'єднань і вузлів з різнорідних матеріалів є залишкові напруження і деформації, які можуть привести до порушення точності і працездатності вузла, зокрема, до руйнування крихких матеріалів.

Весь процес охолодження після пайки і ДЗ можна умовно розділити на 3 періоди:

1. область високих температур, коли пружні деформації практично відсутні, визначальну роль відіграють миттєві пластичні і деформації повзучості;
2. область середніх температур, коли пружні і деформації повзучості малі, визначальну роль відіграють миттєві пластичні деформації;
3. область низьких температур, коли миттєві пластичні і деформації повзучості малі, визначальну роль відіграють пружні деформації.

Останній період з точки зору залишкових напружень становить найбільший практичний інтерес, якщо врахувати, що рівень напружень визначається саме пружними деформаціями, які в першому періоді практично відсутні, а в другому дуже малі внаслідок знижених значень модуля пружності і межі плинності і протікання процесів релаксації при повільному охолодженні.

Тому на першому етапі роботи досліджувалося НД стан вузлів саме в пружній стадії роботи з урахуванням властивостей, середніх в діапазоні температур ДЗ і пайки. Потім вирішувалися аналогічні пластичні задача і порівнювалися результати з пружними.

Розглядалися вузли, отримані пайкою з тиском, тому наявність тонкого прошарку припою не враховували.

Дослідження проводилися на циліндричних вузлах методом комп'ютерного моделювання з використанням програмного комплексу ANSYS (2025 версії). Вирішувалися осесиметричні задачі з використанням KE типу PLANE182. Модель рівномірно розбивалася на квадратні елементи розміром 0,02x0,02мм.

Загальний вид фізичних і кінцево-елементних (КЕ) моделей показаний на рис.

3.1.

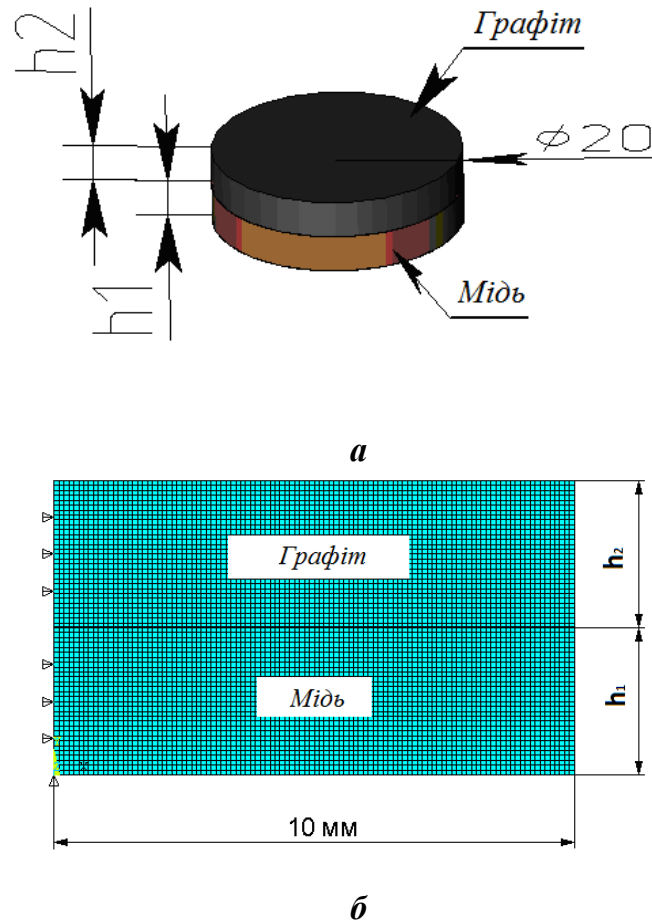


Рисунок 3.1. Фізична (а) і КЕ (б) моделі досліджуваних вузлів

Досліджувані з'єднання мали такі геометричні параметри: радіус моделі (ширина осесиметричної КЕ-схеми) становив $R = 10$ мм. Загальна висота вузла ($h_1 + h_2$) змінювалася в межах 4–16 мм, що відповідало різним комбінаціям товщин шарів міді та графіту в складі з'єднання.

Для визначення впливу співвідношення товщин контактуючих матеріалів товщина кожного шару варіювалася в інтервалі 2–8 мм з кроком 1 мм. Усі досліджені комбінації наведені в табл. 3.1. Відповідно змінювався і ступінь «втягнутості» вузлів за шириною, що оцінювали через геометричне відношення $R/(h_1 + h_2)$, яке набувало значень від 2,5 (варіант 1) до 0,625 (варіант 49).

У роботі аналізувався залишковий напружений стан вузлів, який формувався під час охолодження після пайки. Моделювання виконували для температурного спаду на 800 °С, що відповідає реальному технологічному циклу охолодження паяних графітно-мідних з'єднань.

Таблиця 3.1. Варіанти поєднань товщин (мм) шарів міді і графіту і ступеня витягнутості досліджуваних вузлів

№ варіанту	Товщина міді, h_1	Товщина графіту, h_2	$h_1 + h_2$	$R/(h_1 + h_2)$	№ варіанту	Товщина міді, h_1	Товщина графіту, h_2	$h_1 + h_2$	$R/(h_1 + h_2)$
1	2	2	4	2,50	26	5	6	11	0,91
2	2	3	5	2,00	27	5	7	12	0,83
3	2	4	6	1,67	28	5	8	13	0,77
4	2	5	7	1,43	29	6	2	8	1,25
5	2	6	8	1,25	30	6	3	9	1,11
6	2	7	9	1,11	31	6	4	10	1,00
7	2	8	10	1,00	32	6	5	11	0,91
8	3	2	5	2,00	33	6	6	12	0,83
9	3	3	6	1,67	34	6	7	13	0,77
10	3	4	7	1,43	35	6	8	14	0,71
11	3	5	8	1,25	36	7	2	9	1,11
12	3	6	9	1,11	37	7	3	10	1,00
13	3	7	10	1,00	38	7	4	11	0,91
14	3	8	11	0,91	39	7	5	12	0,83
15	4	2	6	1,67	40	7	6	13	0,77
16	4	3	7	1,43	41	7	7	14	0,71
17	4	4	8	1,25	42	7	8	15	0,67
18	4	5	9	1,11	43	8	2	10	1,00
19	4	6	10	1,00	44	8	3	11	0,91
20	4	7	11	0,91	45	8	4	12	0,83
21	4	8	12	0,83	46	8	5	13	0,77
22	5	2	7	1,43	47	8	6	14	0,71
23	5	3	8	1,25	48	8	7	15	0,67
24	5	4	9	1,11	49	8	8	16	0,625
25	5	5	10	1,00					

3.2. Властивості матеріалів, прийняті в розрахунках

Фізико-механічні властивості міді та графіту в моделюванні задавалися як постійні середні значення, характерні для розглянутого температурного діапазону. Таке припущення є типовим для аналітичних та чисельних досліджень залишкових напружень у з'єднаннях різномірних матеріалів, оскільки дозволяє уникнути

надмірного ускладнення моделі без суттєвого зниження точності розрахунків. Середні параметри матеріалів були взяті за даними літератури [77] і наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Властивості матеріалів досліджуваних вузлів, прийняті при моделюванні

Властивості	Мідь	Графіт
Модуль пружності E , 10^5 МПа	1,2	0,093
КЛТР α , 10^{-6} K^{-1}	16,7	4,8
Коефіцієнт Пуассона μ	0,34	0,18
Границя плинності, МПа	50	—

3.3. Результати моделювання полів напружень

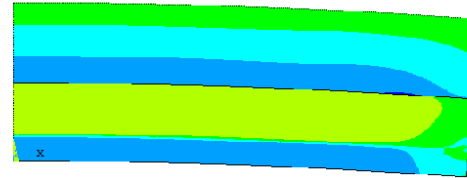
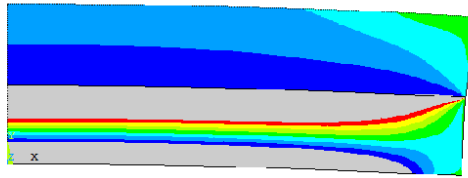
Поля залишкових напружень — радіальних σ_x , осьових σ_y , окружних σ_z , дотичних τ_{xy} та еквівалентних σ_{eq} (за Мізесом) — наведені на рисунках 3.2–3.9. Аналіз розподілу радіальних напружень (рис. 3.2) показує, що при зміні товщини з'єднаних шарів та їх співвідношення загальний характер напружених полів залишається подібним.

У пружній стадії роботи суттєво проявляється більша жорсткість мідного шару порівняно з графітовим [77]. У міді радіальні напруження мають значно вищий рівень і змінюються за величиною та знаком у широкому діапазоні (понад ± 100 МПа). Для шару графіту, який характеризується меншим коефіцієнтом лінійного теплового розширення, напруження переважно стискаючі, із максимумом до 100 МПа в зоні стику та поступовим зменшенням у напрямку до верхньої вільної поверхні.

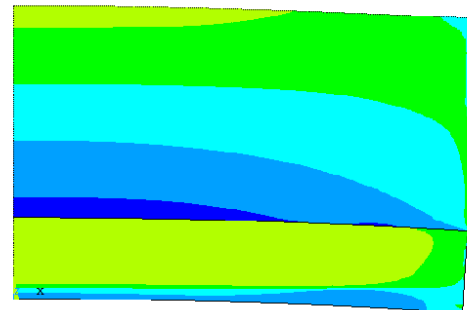
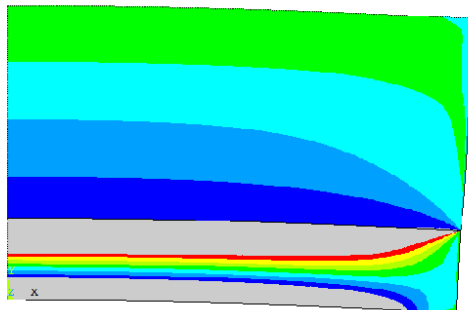
За умов, коли товщина графітового шару істотно перевищує товщину мідного (варіанти 2+5 та 2+8 мм), у пружному розрахунку поблизу верхньої вільної поверхні графіту виникають розтягуючі напруження понад 20 МПа (рис. 3.3), що потенційно може призвести до локального руйнування графіту.

У пластичній постановці задачі рівень радіальних напружень у обох матеріалах знижується, особливо у вузлах із малою товщиною мідного шару (2+2,

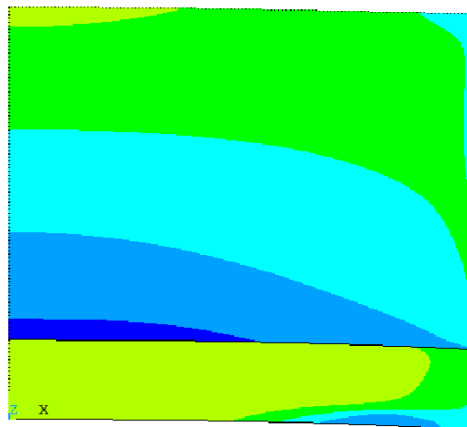
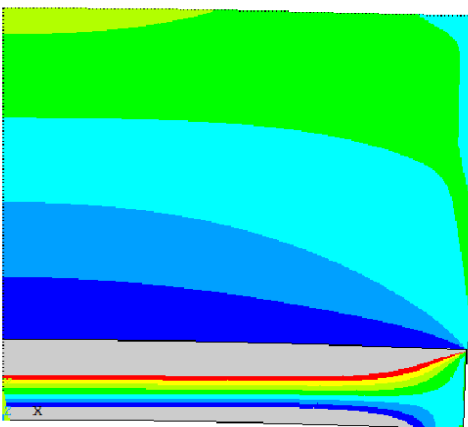
2+5, 2+8 мм). Характер розподілу також змінюється — найбільш істотно в мідній частині вузла, де виникають основні пластичні деформації. Розтягуючі напруження поблизу верхньої поверхні графіту з'являються навіть за незначного переважання його товщини над товщиною мідного шару (варіант 5+8 мм).



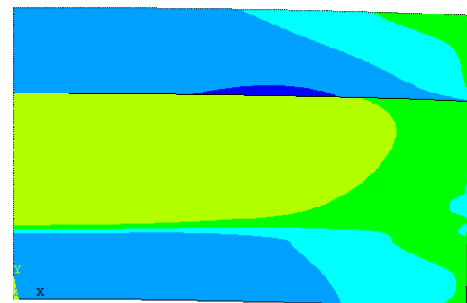
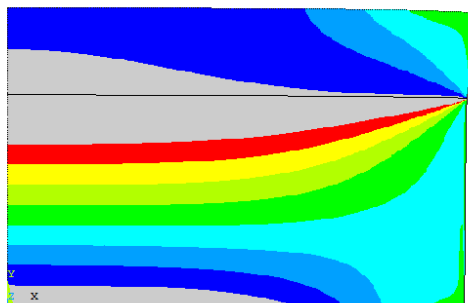
2+2



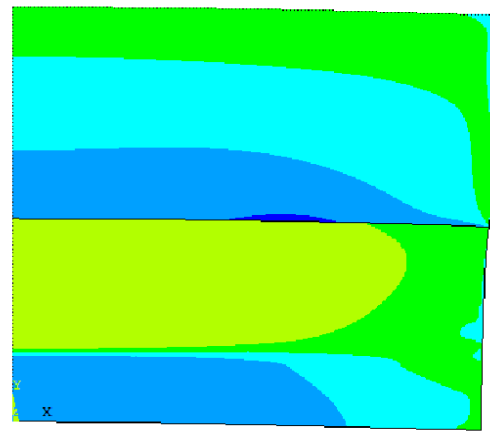
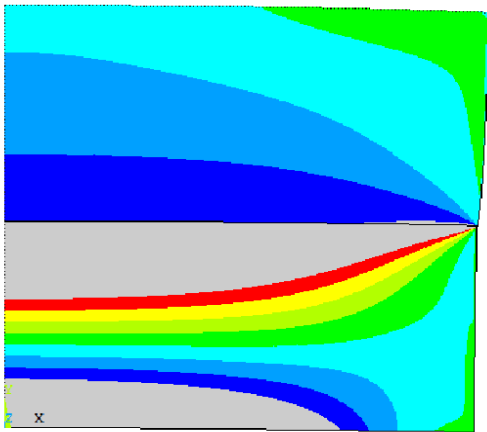
2+5



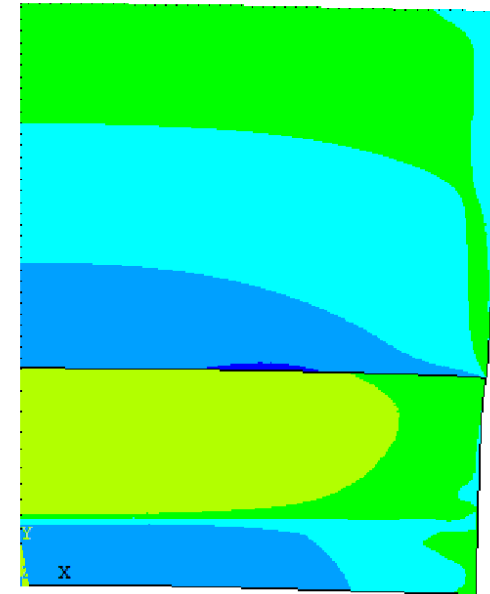
2+8



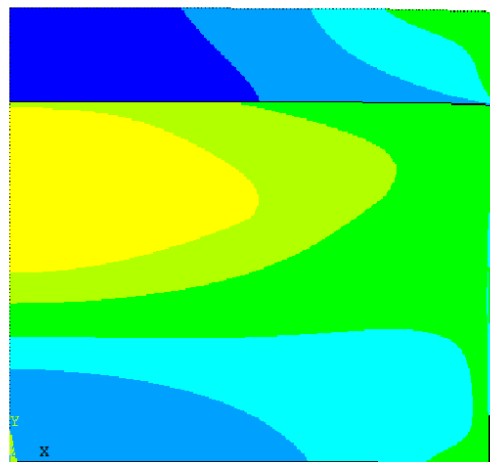
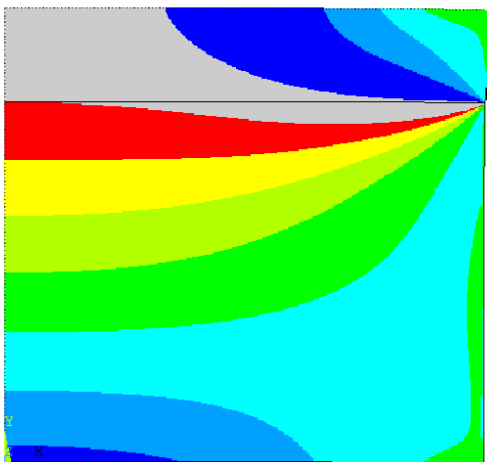
5+2



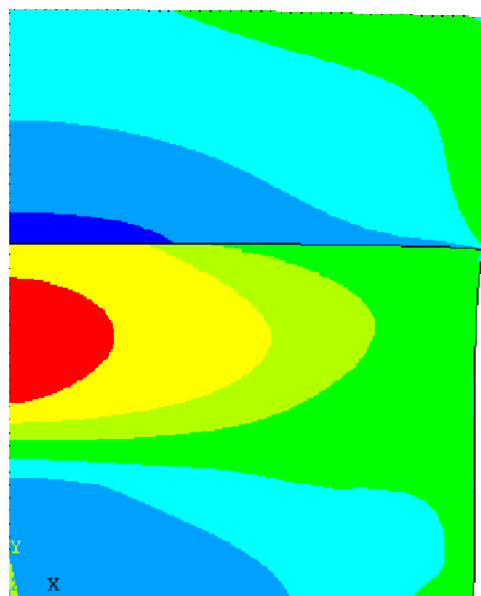
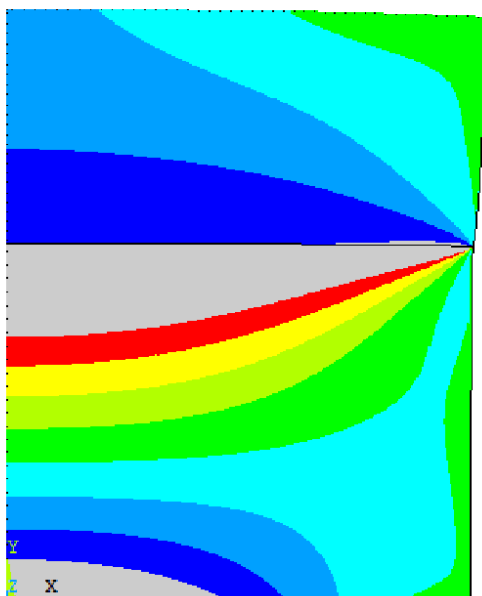
5+5



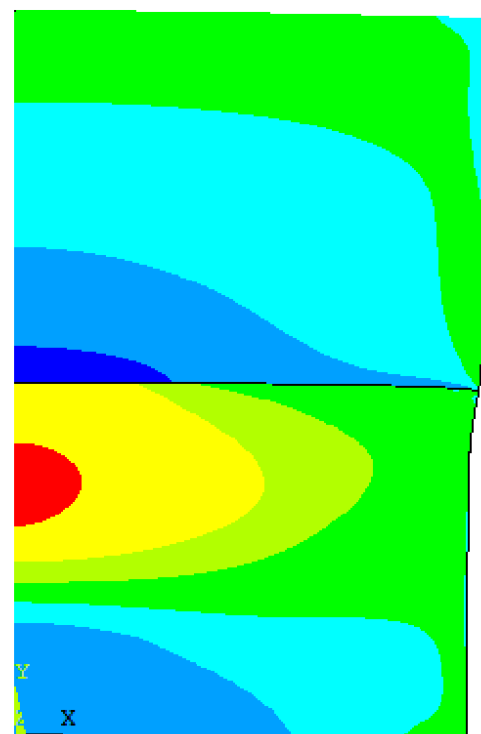
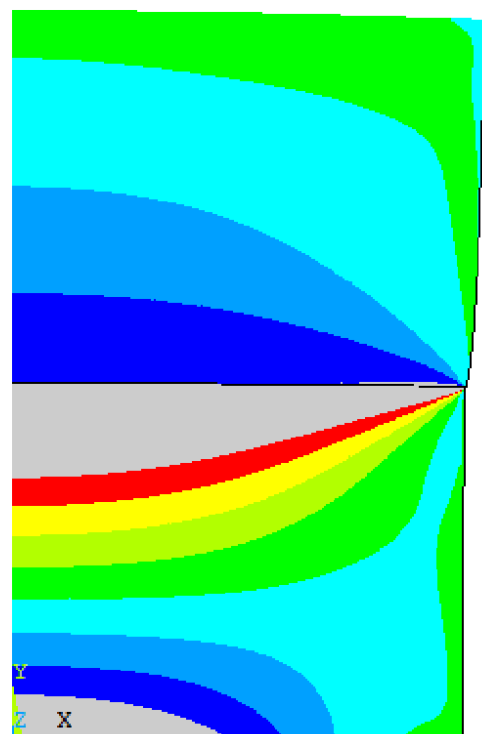
5+8



8+2



8+5



8+8



Рисунок 3.2. Поля радіальних напружень в вузлах вар. 2+2 (а), 2+5 (б), 2+8 (в), 5+2 (г), 5+5 (д), 5+8 (е), 8+2 (ж), 8+5 (з), 8+8 (и), в пружному (ліворуч) і пластичному (праворуч) рішеннях

Осьові напруження при варіації товщини шарів також зберігають подібний загальний характер розподілу, особливо в зоні зовнішньої циліндричної поверхні

(рис. 3.4). У цій області високі стискаючі напруження на поверхні міді переходять у зону розтягуючих напружень на поверхні графітового шару. Розмір цієї зони та рівень розтягуючих напружень зростають зі збільшенням відносної товщини графіту (рис. 3.5).

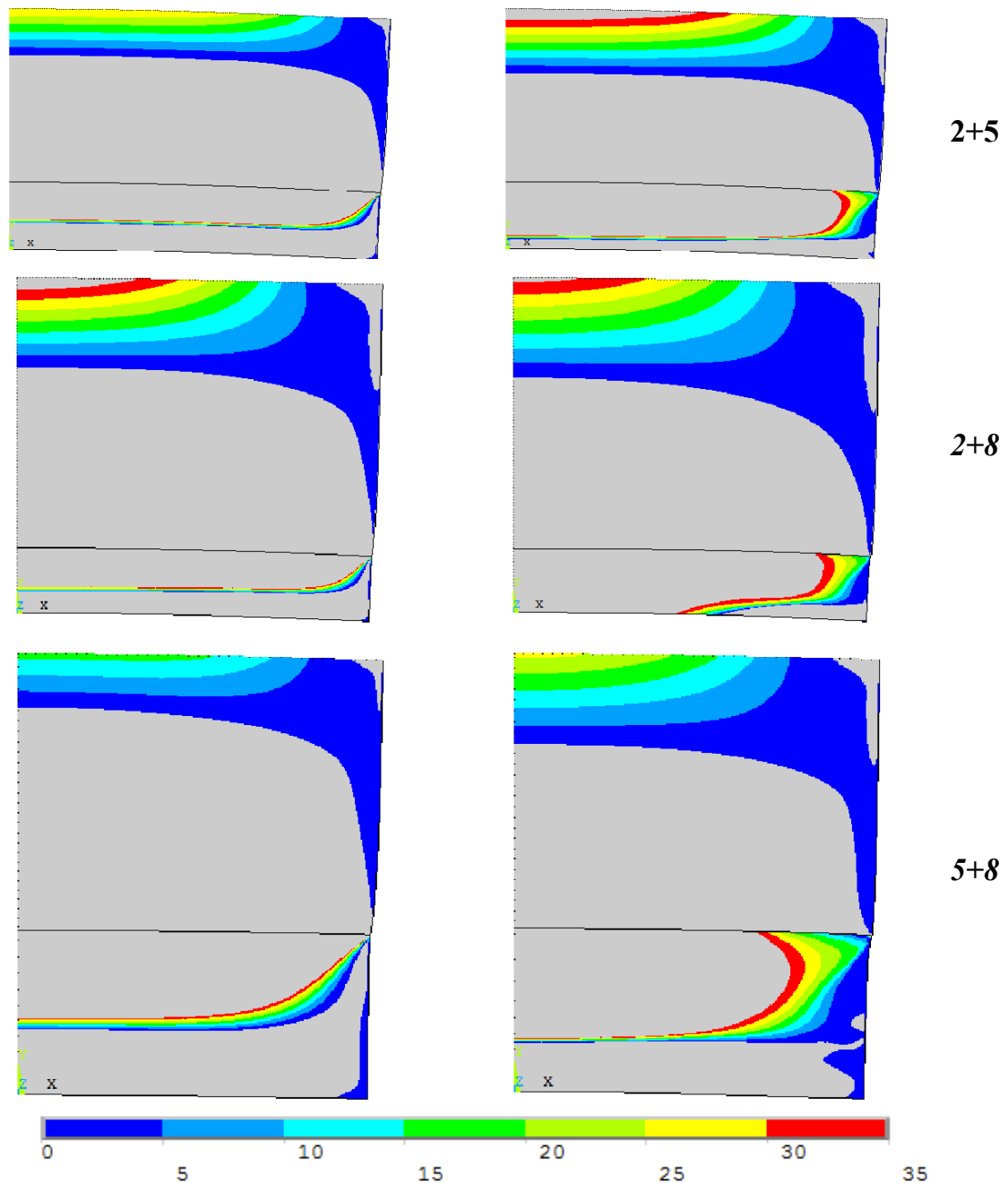
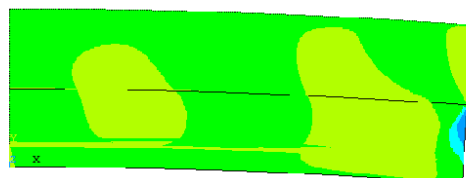
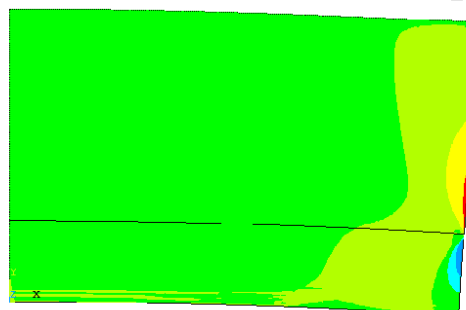
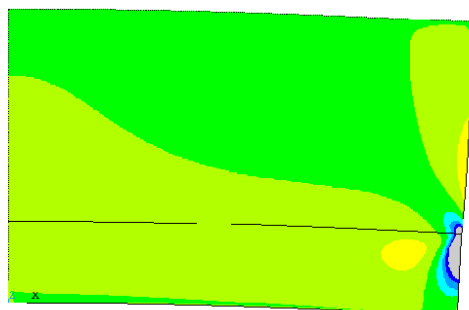


Рисунок 3.3. Поля радіальних розтягуючих напружень в вузлах 2 +5, 2 +8 і 5 +8 в пружному (ліворуч) і пластичному (праворуч) рішеннях

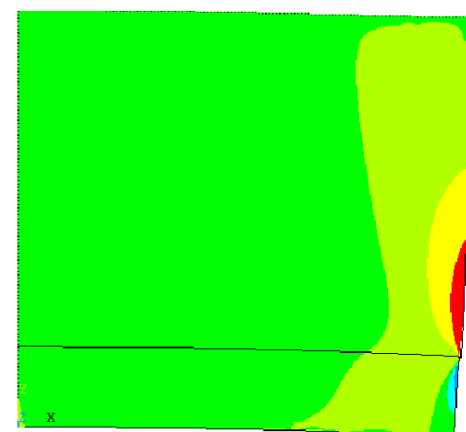
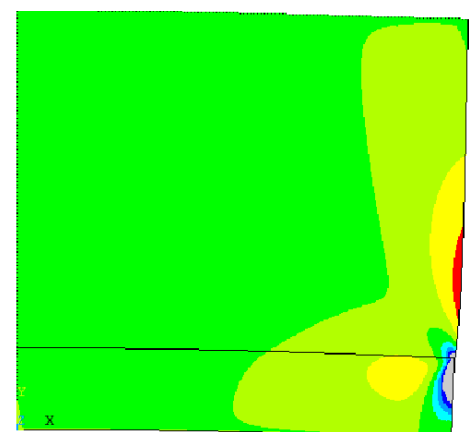
Друга зона розтягуючих осьових напружень формується у внутрішній частині вузла, на певній відстані від зовнішньої циліндричної поверхні, з максимумом напружень у мідному шарі (рис. 3.5).



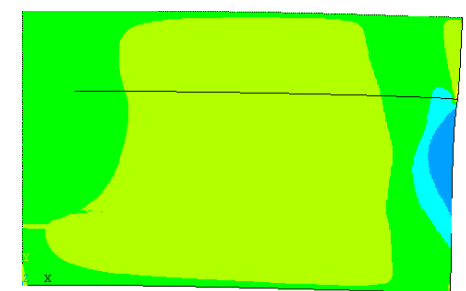
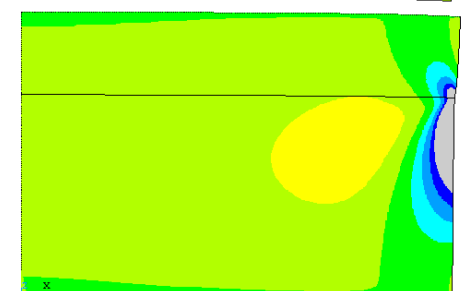
2+2



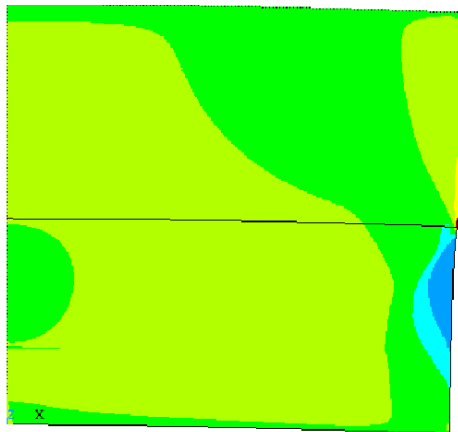
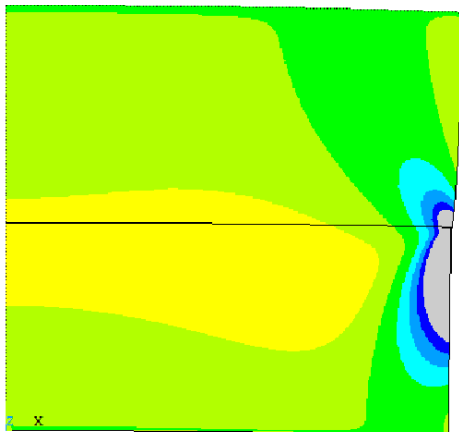
2+5



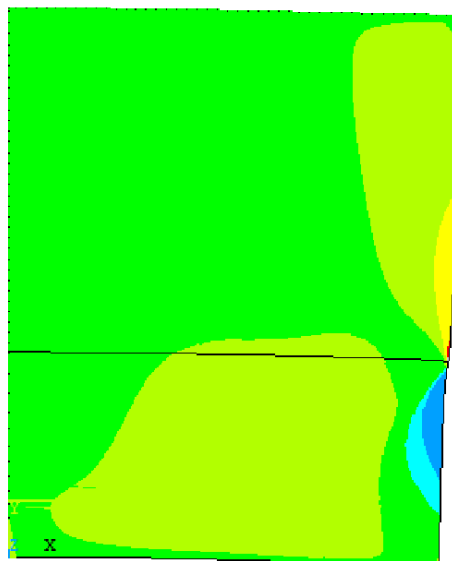
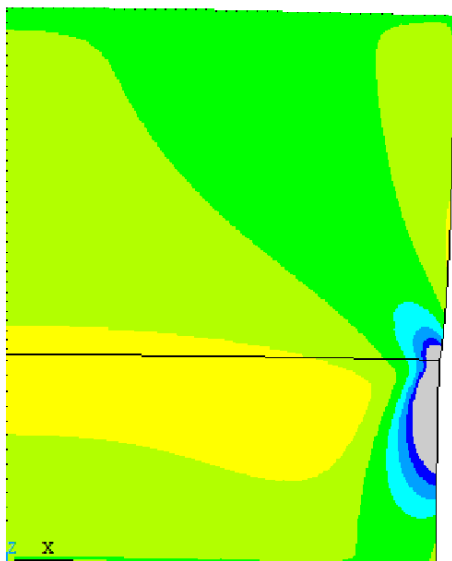
2+8



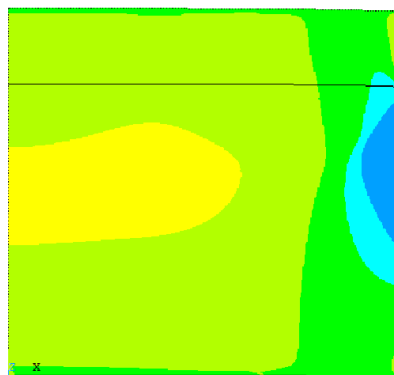
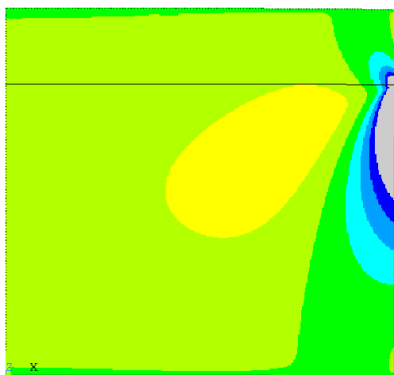
5+2



5+5



5+8



8+2

Зм.	Лист	№ Документа	Підпис	

MP 8.132.6121зм.01.04.03 ПЗ

Лист

42

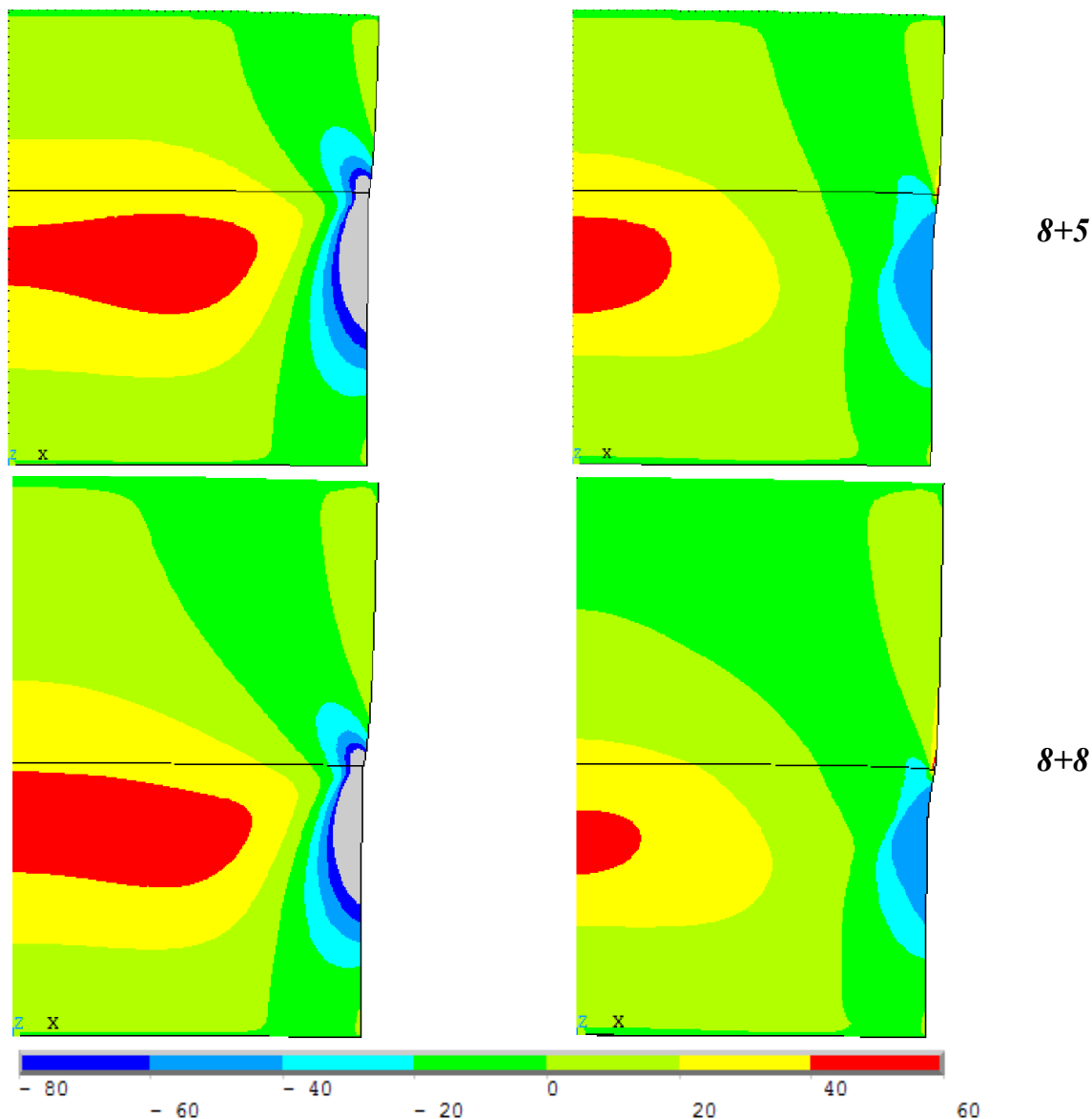
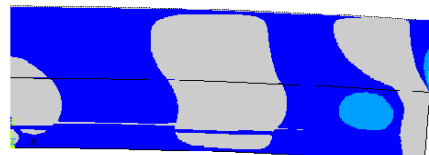
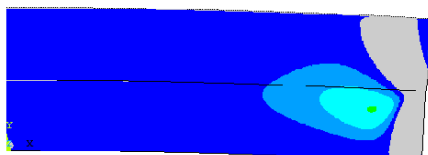
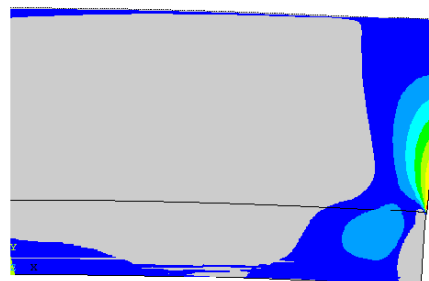
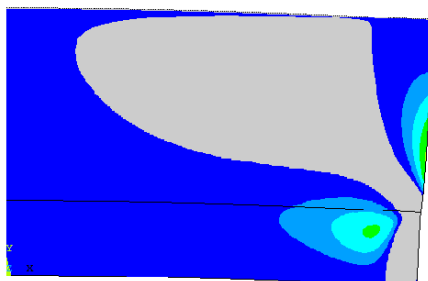


Рисунок 3.4. Поля осьових напружень в вузлах вар. 2+2 (а), 2+5 (б), 2+8 (в), 5+2 (г), 5+5 (д), 5+8 (е), 8+2 (ж), 8+5 (з), 8+8 (и), в пружному (ліворуч) і пластичному (праворуч) рішеннях

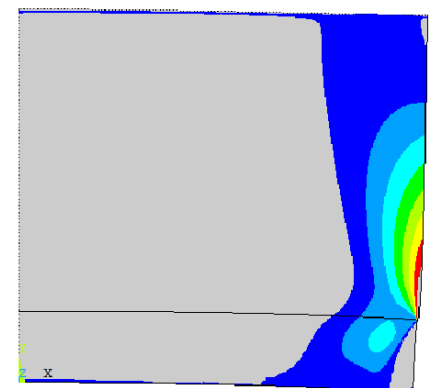
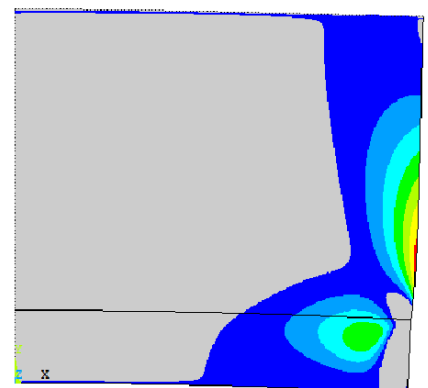
Її геометричні розміри та інтенсивність напружень істотно залежать від співвідношення товщин шарів. Зі збільшенням відносної товщини мідного шару ця зона помітно розширюється, а рівень розтягуючих осьових напружень у ній зростає. Така закономірність зумовлена тим, що більш масивний мідний шар проявляє вищу жорсткість та сильніше стримує деформації графітового шару, що, у свою чергу, підсилює осьові напруження в центральній частині вузла.



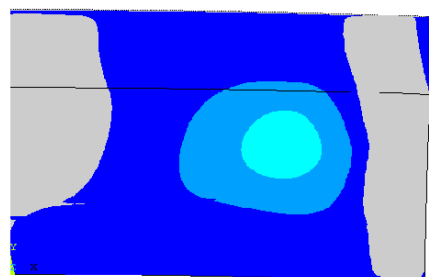
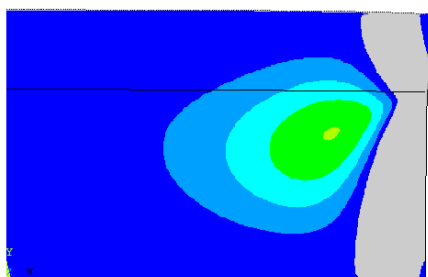
2+2



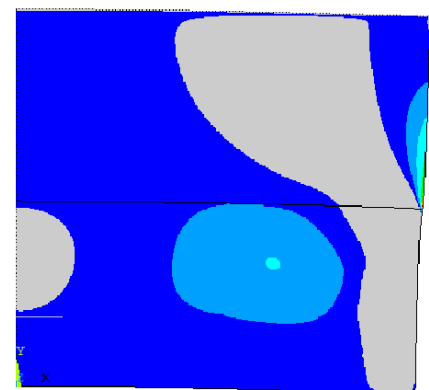
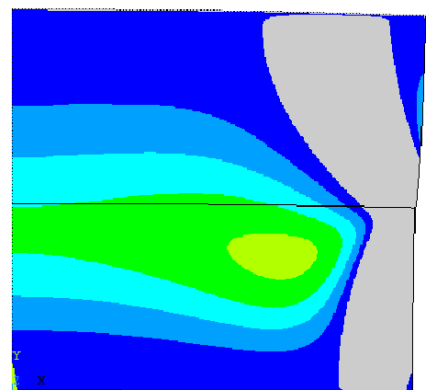
2+5



2+8



5+2



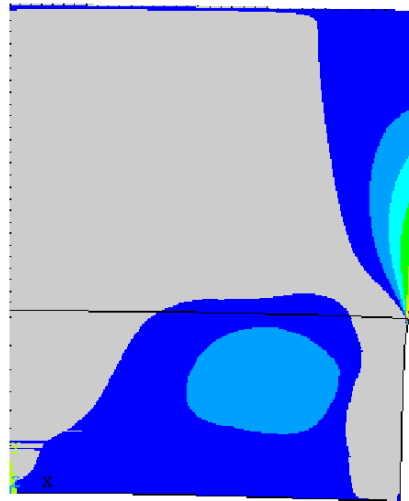
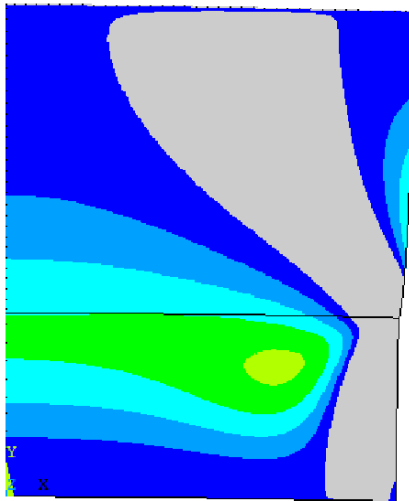
5+5

Зм.	Лист	№ Документа	Підпис	

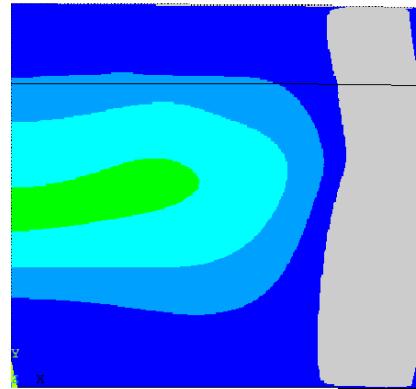
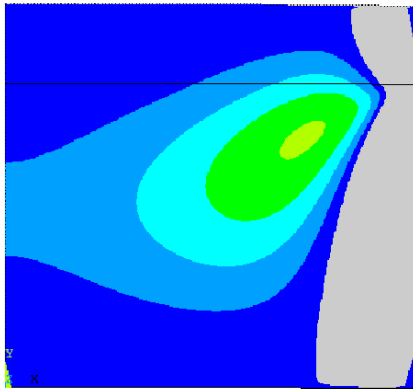
MP 8.132.6121зм.01.04.03 ПЗ

Лист

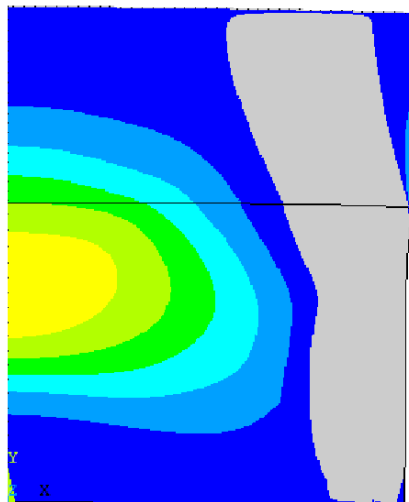
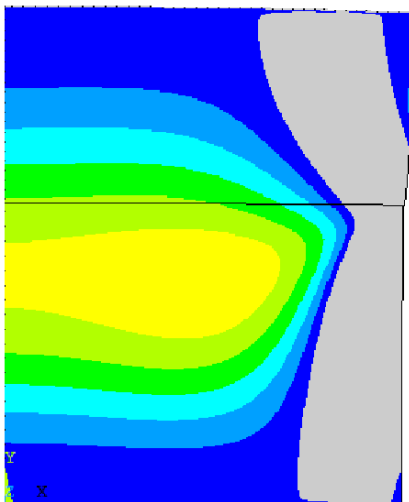
44



5+8



8+2



8+5

Зм.	Лист	№ Документа	Підпис	

MP 8.132.6121зм.01.04.03 ПЗ

Лист

45

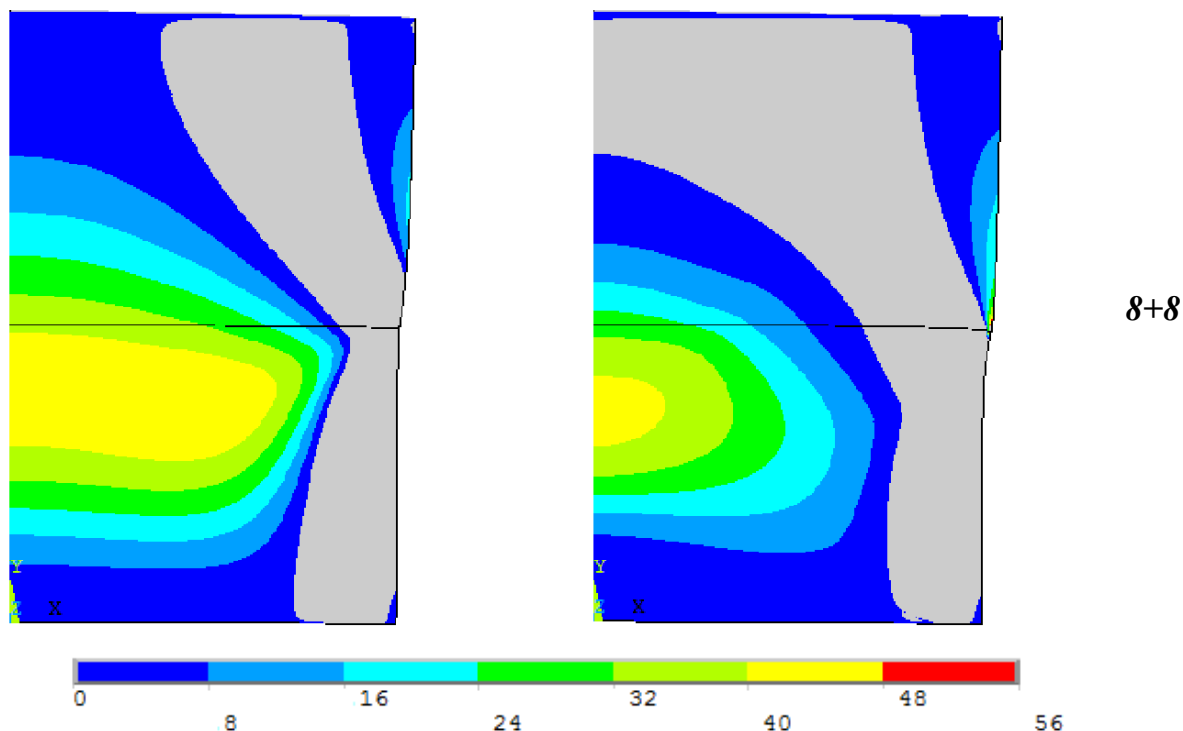
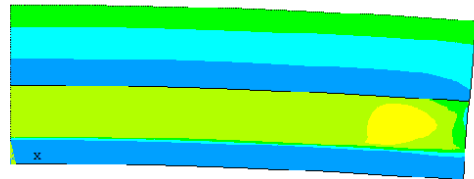
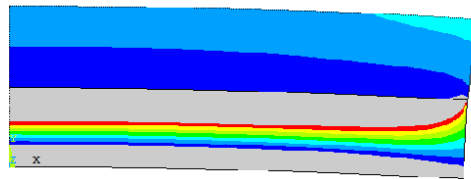


Рисунок 3.5. Поля осевих розтягуючих напружень в вузлах вар. 2+2, 2+5, 2+8, 5+2, 5+5, 5+8, 8+2, 8+5, 8+8, в пружному (ліворуч) і пластичному (праворуч) рішеннях

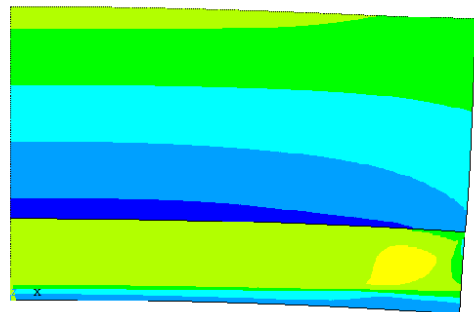
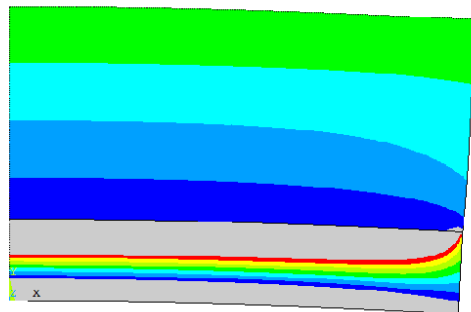
Унаслідок розвитку пластичних деформацій у мідному шарі рівень напружень у першій зоні (розташованій на зовнішній поверхні графітового шару) збільшується, а її розміри зростають. Водночас друга зона розтягуючих осевих напружень, що формується у внутрішній частині вузла, навпаки, зменшується за розмірами та інтенсивністю. Ця зміна зумовлена релаксацією напружень у міді та перерозподілом деформацій між шарами, що особливо проявляється при значній різниці товщин.

Поля окружних (тангенціальних) напружень за своїм характером майже повністю збігаються з полями радіальних (рис. 3.6 і 3.7). У мідному шарі напруження змінюються як за знаком, так і за величиною, демонструючи чергування ділянок стиску та розтягу, що є наслідком його більшої жорсткості та здатності до пластичного деформування. У графітовому шарі, навпаки, окружні напруження переважно стискаючі, що відповідає низькому коефіцієнту лінійного теплового розширення графіту та його обмеженій здатності сприймати розтяг.

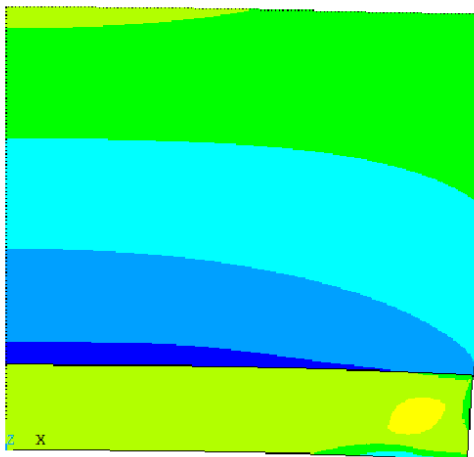
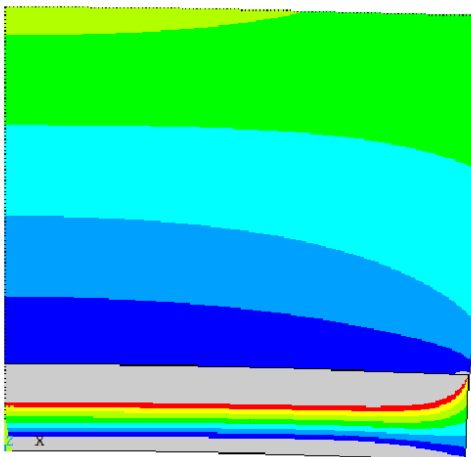
Лише за окремих співвідношень товщин шарів (2 + 5 та 2 + 8 у пружній постановці; 2 + 5, 2 + 8 і 5 + 8 — у пластичній) на верхній вільній поверхні графіту стискаючі напруження переходять у розтягуючі. Такі локальні зони розтягу становлять потенційну небезпеку, оскільки можуть ініціювати мікротріщини в крихкому графітовому шарі.



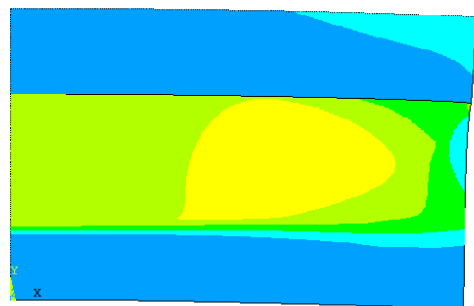
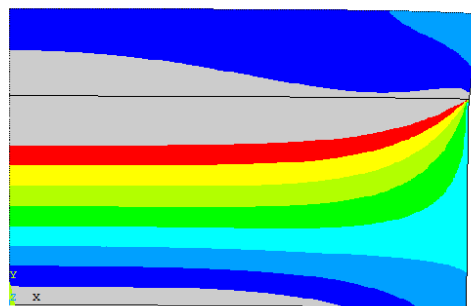
2+2



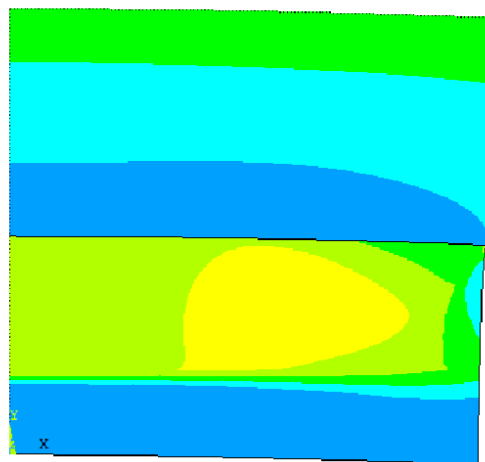
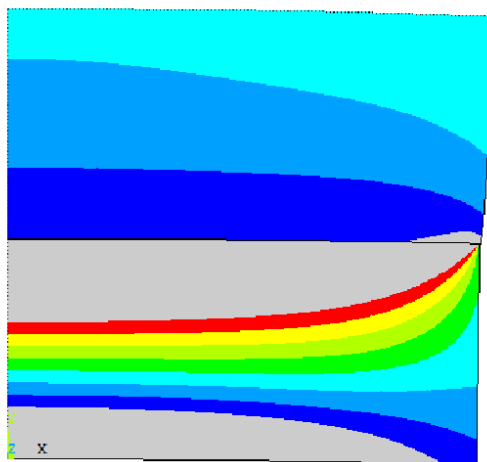
2+5



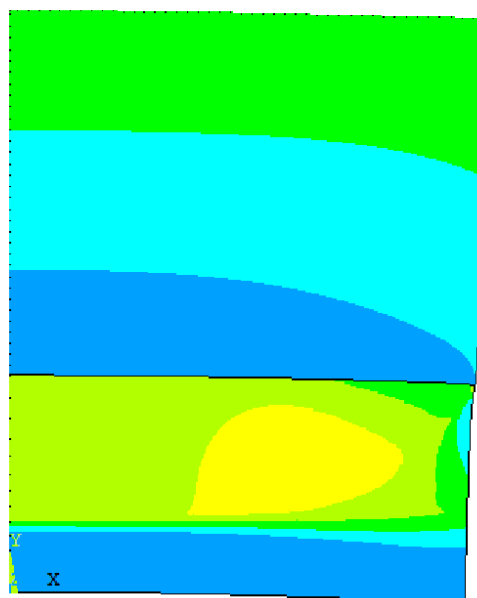
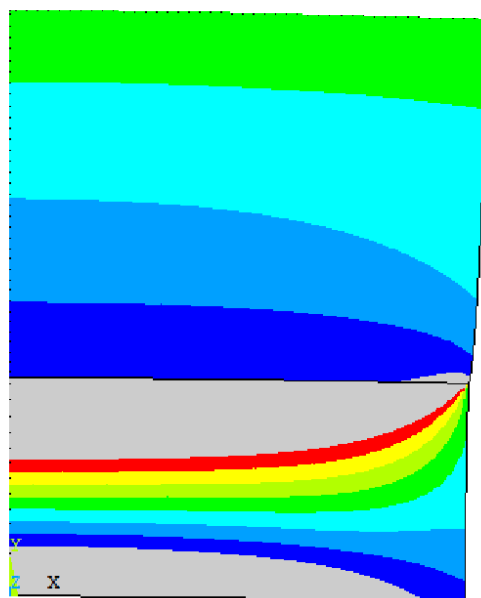
2+8



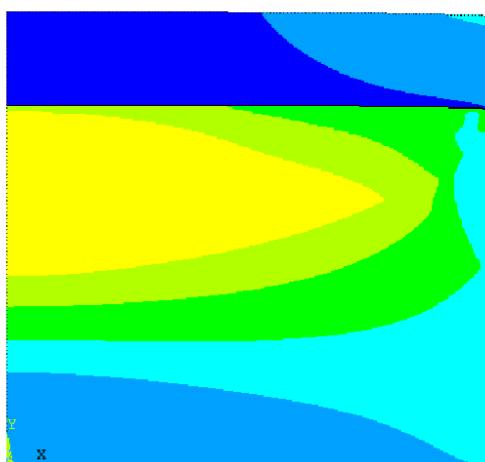
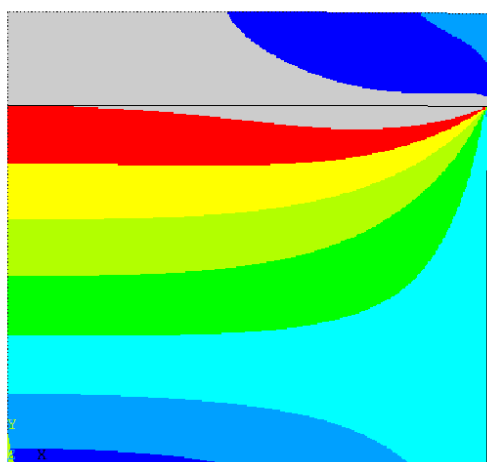
5+2



5+5



5+8



8+2

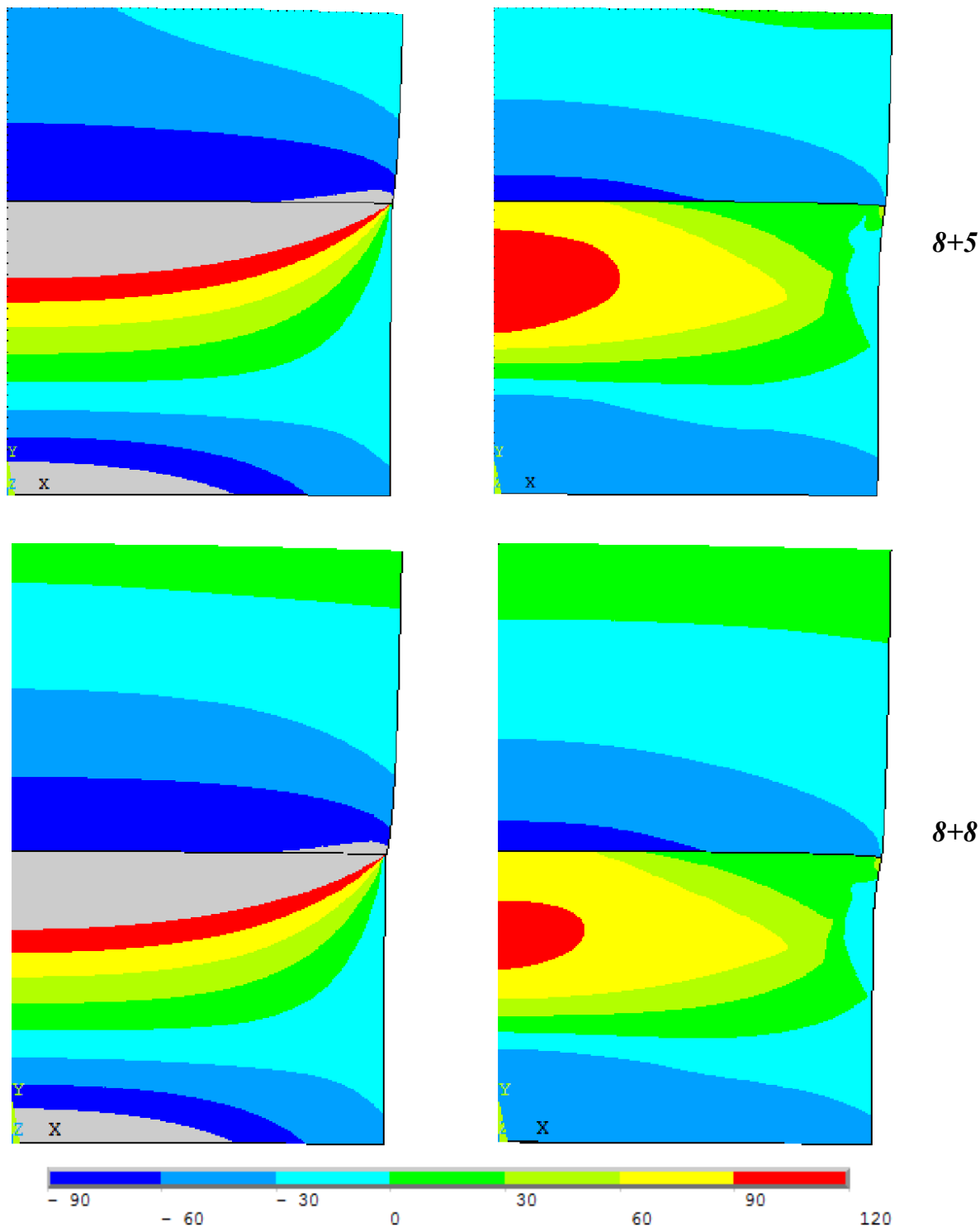


Рисунок 3.6. Поля окружних напружень в вузлах вар. 2 +2, 2 +5, 2 +8, 5 +2, 5 +5, 5 +8, 8 +2, 8 +5, 8 +8, в пружному (ліворуч) і пластичному (праворуч) рішеннях

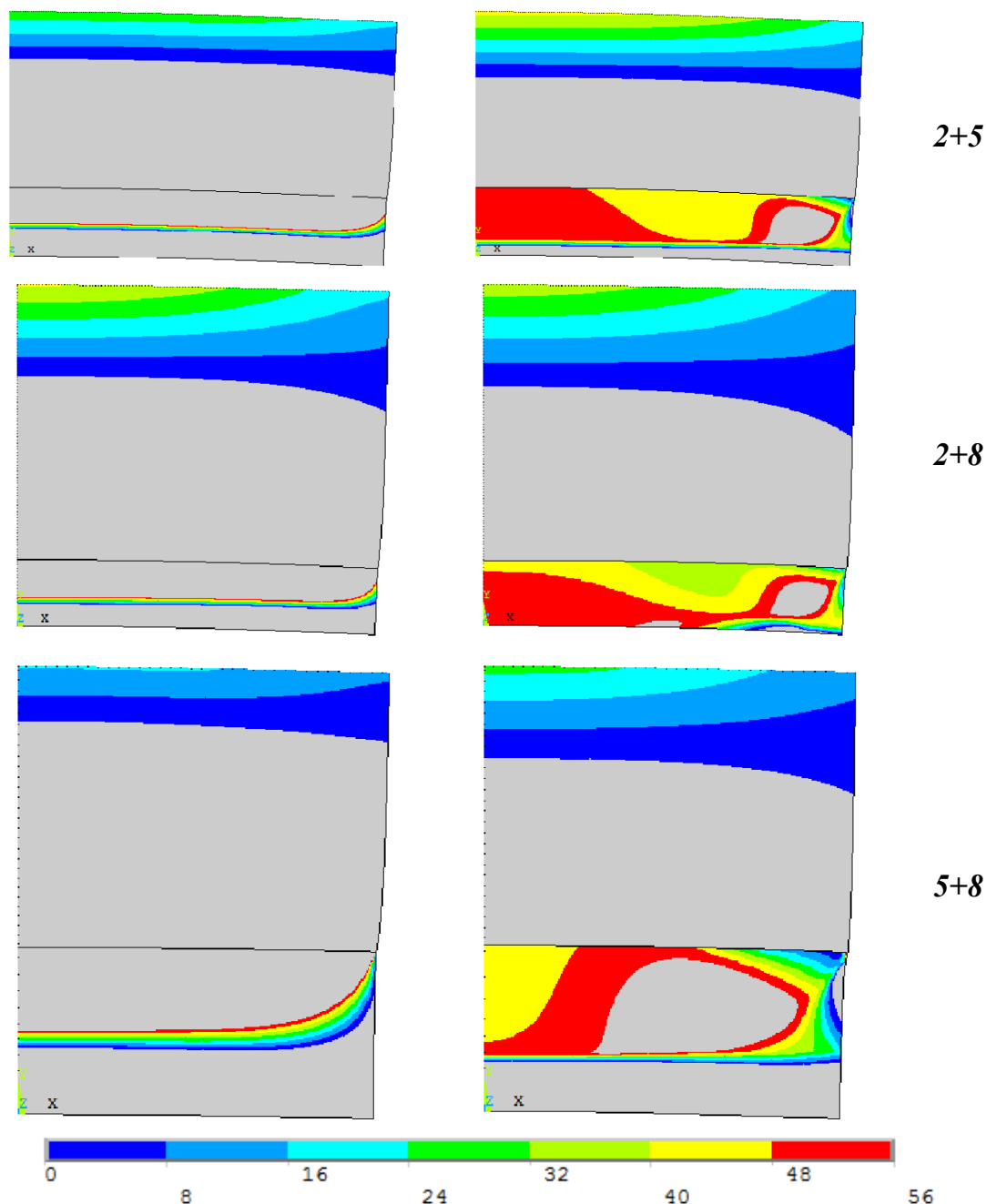
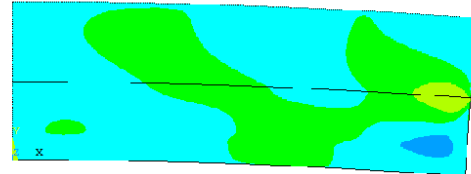
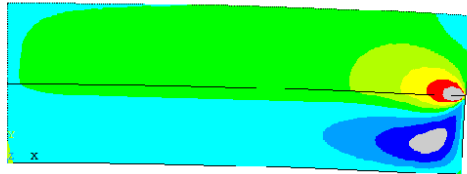


Рисунок 3.7. Поля окружних розтягуючих напружень в вузлах 2 +5, 2 +8 і 5 +8, в пружному (ліворуч) і пластичному (праворуч) рішеннях

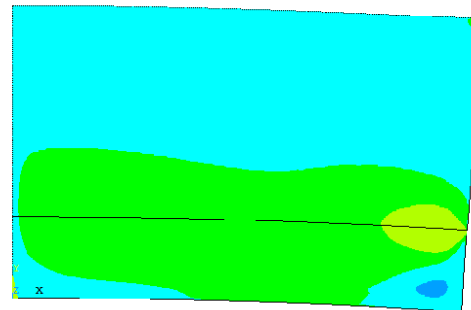
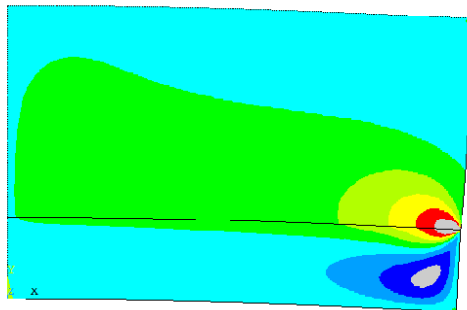
Аналіз полів дотичних напружень у досліджуваних вузлах (рис. 3.8) засвідчує, що їх просторовий розподіл у цілому подібний до розподілу в з'єднаннях, сформованих із матеріалів із близькими значеннями жорсткості. Найвищі значення дотичних напружень концентруються в зоні стику матеріалів, безпосередньо поблизу зовнішньої циліндричної поверхні вузла. У міру віддалення від цієї поверхні

інтенсивність дотичних напружень монотонно зменшується та прямує до нуля на осі симетрії вузла, що відповідає умовам осесиметричної постановки.

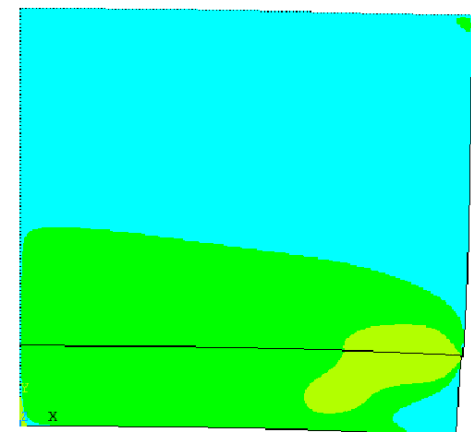
Розвиток пластичних деформацій у мідному шарі практично не змінює загальний характер поля дотичних напружень. Проте їх рівень істотно знижується, що пов'язано з релаксацією напружень та здатністю міді сприймати значні пластичні деформації при зниженні температури. Така поведінка свідчить про домінування пружних властивостей графітового шару та одночасне «поглинання» частини напружень міддю, що знижує ризик локальних руйнувань у зоні стику.



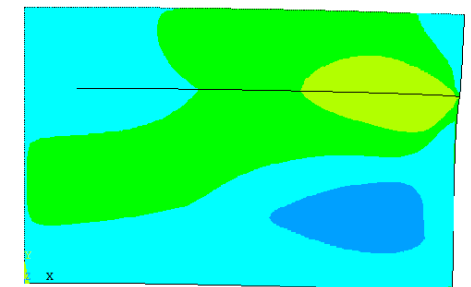
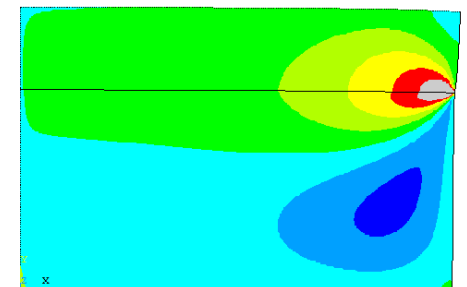
2+2



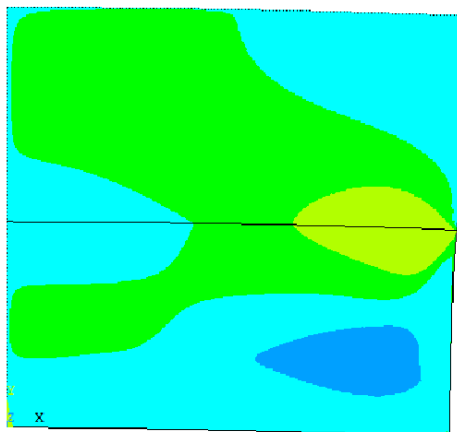
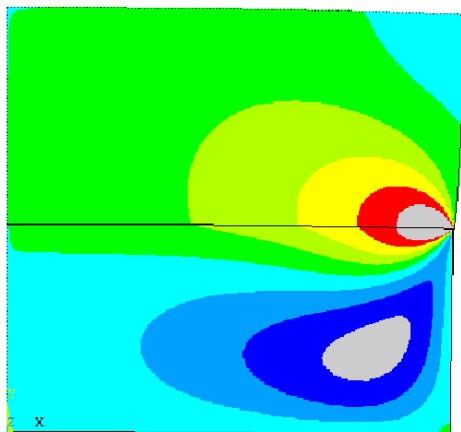
2+5



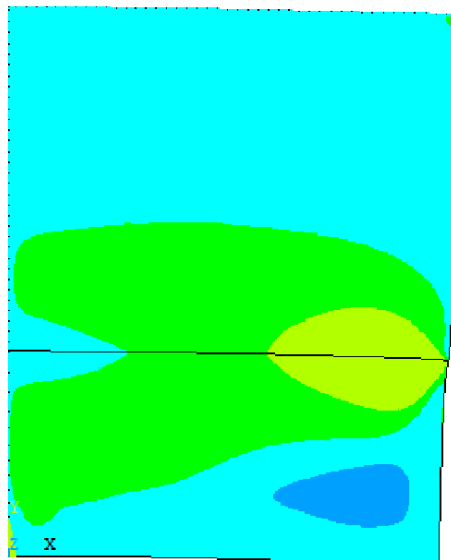
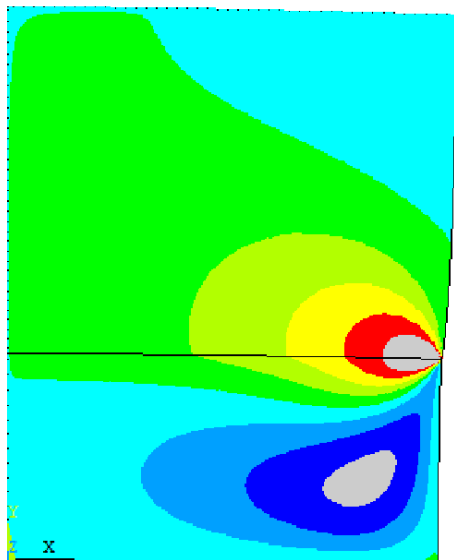
2+8



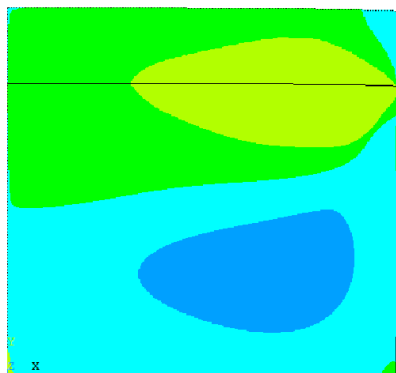
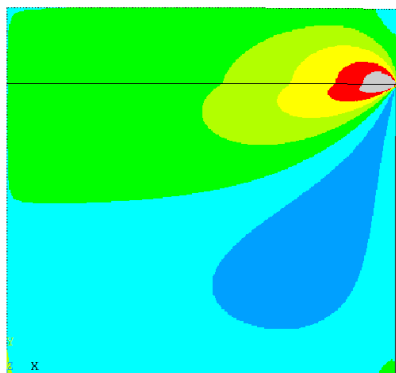
5+2



5+5



5+8



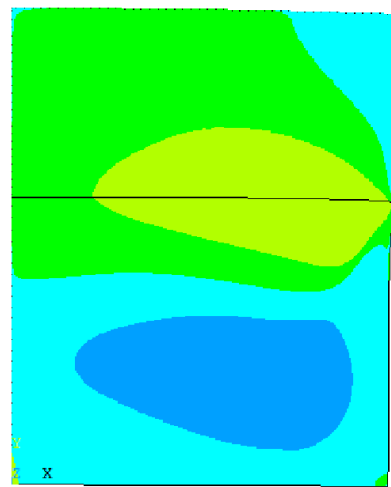
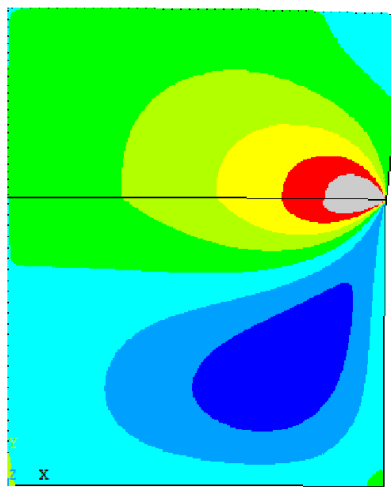
8+2

Зм.	Лист	№ Документа	Підпис	

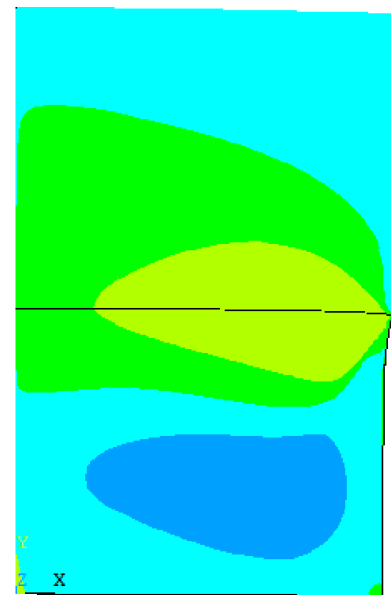
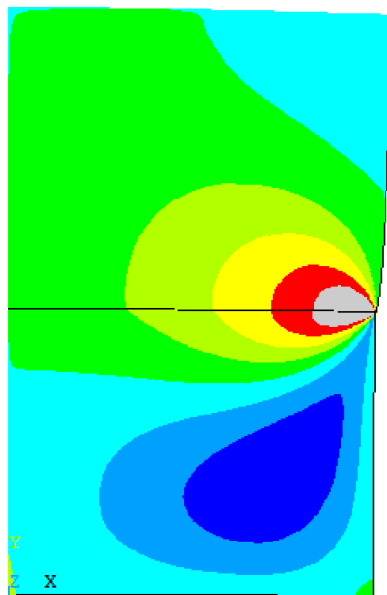
MP 8.132.6121зм.01.04.03 ПЗ

Лист

52



8+5



8+8



Рисунок 3.8. Поля дотичних напружень в вузлах вар. 2 +2, 2 +5, 2 +8, 5 +2, 5 +5, 5 +8, 8 +2, 8 +5, 8 +8, в пружному (ліворуч) і пластичному (праворуч) рішеннях

Максимальні еквівалентні напруження в пружній стадії роботи зосереджуються переважно в мідному шарі, що зумовлено його значно більшою жорсткістю порівняно з графітом (рис. 3.9). Саме мідь, як матеріал із вищими значеннями модуля пружності та межі текучості, сприймає основну частину термічних деформацій, що виникають під час охолодження після пайки.

У процесі подальшого зниження температури в мідному шарі розвиваються пластичні деформації (рис. 3.10), які призводять до суттєвого зменшення рівня

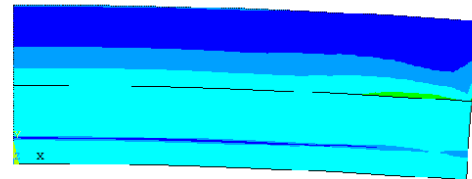
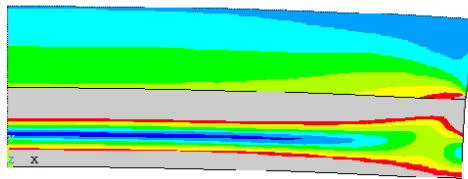
Зм.	Лист	№ Документа	Підпис	

МР 8.132.6121зм.01.04.03 ПЗ

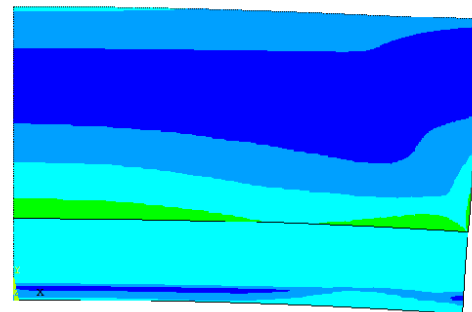
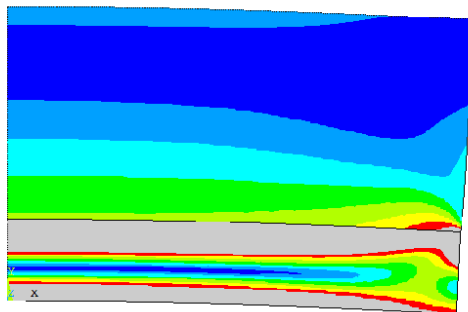
Лист

53

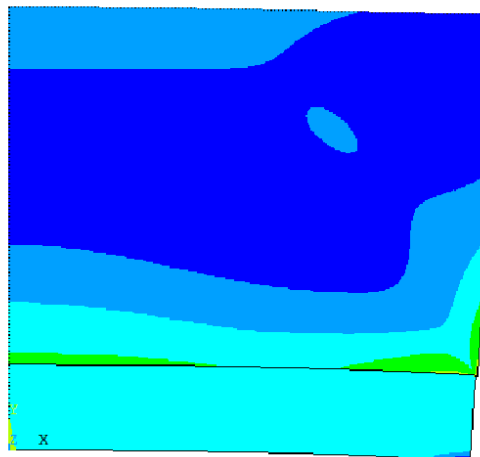
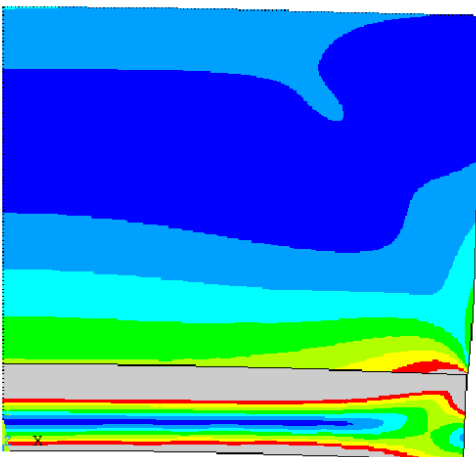
локальних еквівалентних напружень. Розподіл напружень у міді стає більш рівномірним, що свідчить про ефективну релаксацію пікових напружень за рахунок пластичної течії. Така поведінка є характерною для матеріалів із високою пластичністю та пояснює загальну тенденцію до зниження ризику крихкого руйнування у мідній складовій вузла.



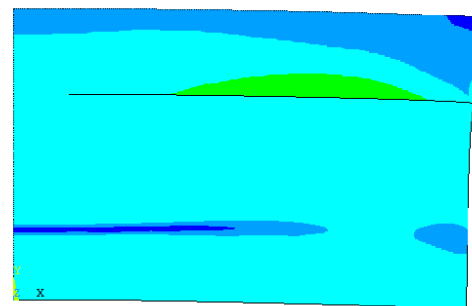
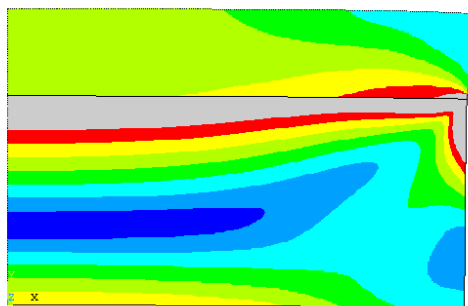
2+2



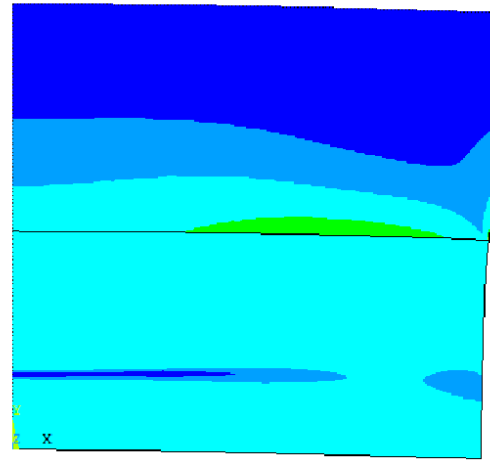
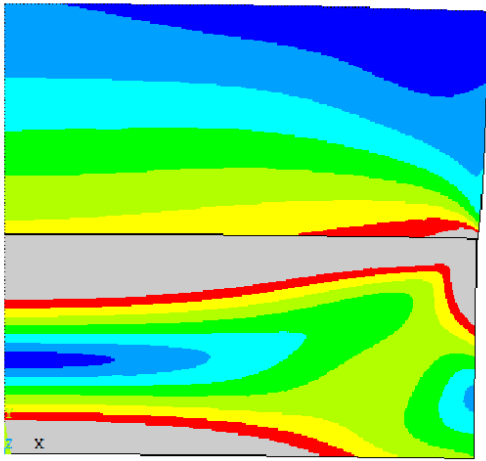
2+5



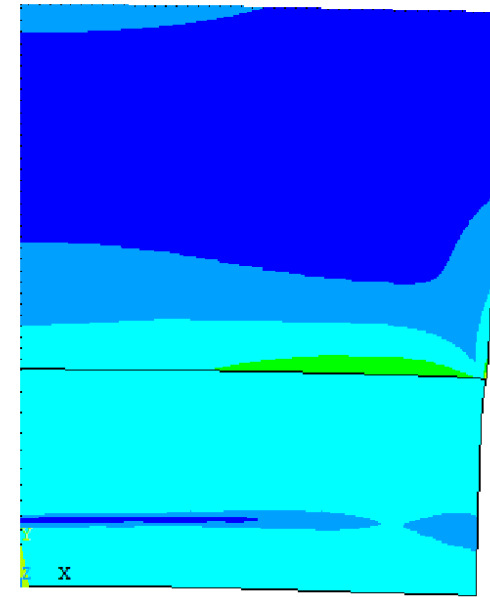
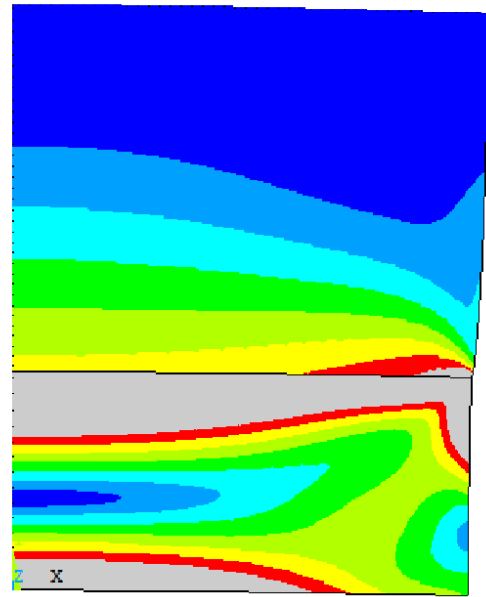
2+8



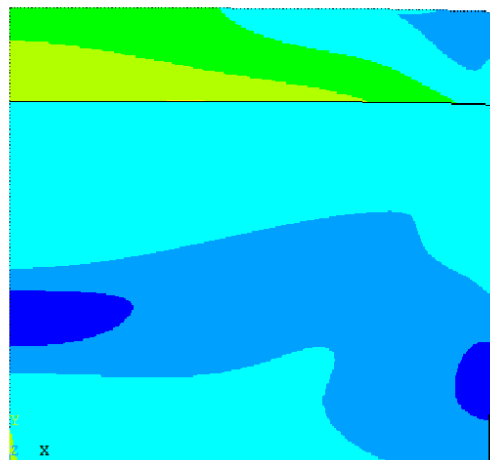
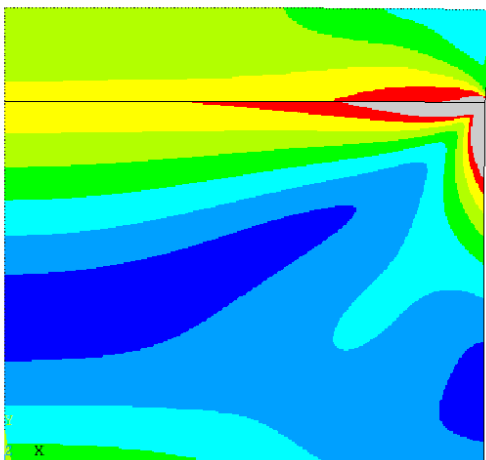
5+2



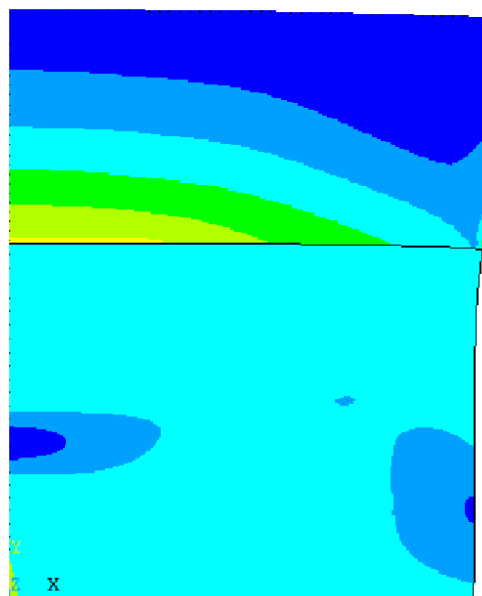
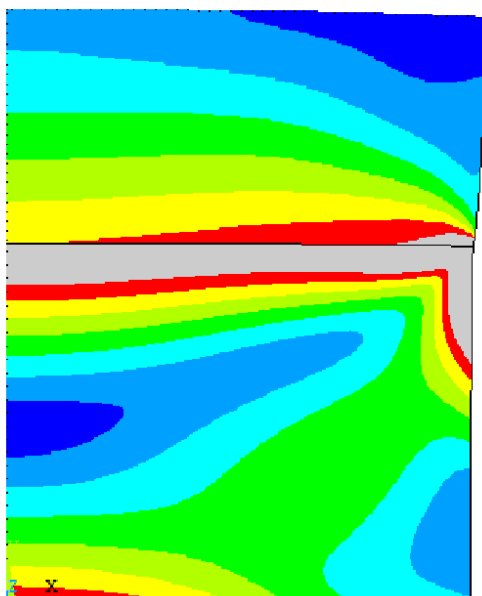
5+5



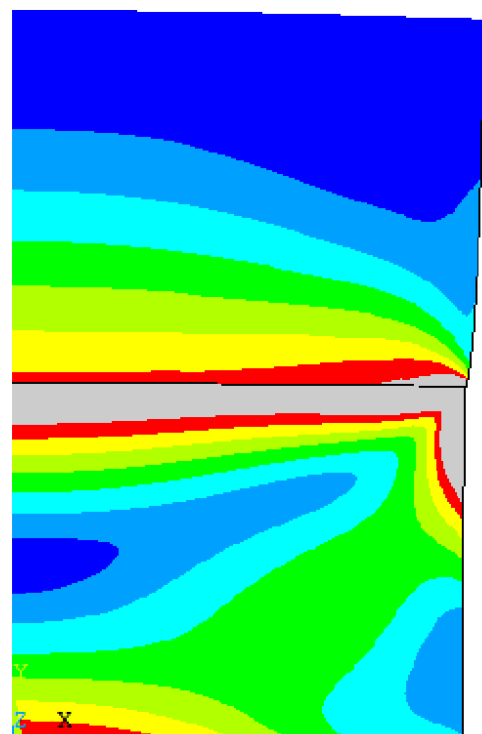
5+8



8+2



8+5



8+8



Рисунок 3.9. Поля еквівалентних напружень в вузлах вар. 2+2 (а), 2+5 (б), 2+8 (в), 5+2 (г), 5+5 (д), 5+8 (е), 8+2 (ж), 8+5 (з), 8+8 (и), в пружному (ліворуч) і пластичному (праворуч) рішеннях

3.4. Залежність максимальних розтягуючих напружень від співвідношення розмірів шарів

З позиції забезпечення цілісності графітно-мідного вузла після охолодження найбільшу небезпеку становлять розтягуючі напруження в графітовому шарі, оскільки графіт характеризується низькою міцністю саме при розтягу. Аналіз розподілу напружень показав, що максимальні розтягуючі осьові напруження виникають у двох характерних зонах:

- на зовнішній циліндричній поверхні графіту,
- у внутрішній частині вузла, поблизу межі поділу мідь–графіт.

Для кількісної оцінки впливу пластичних деформацій у мідному шарі та впливу співвідношення товщин шарів на рівень розтягуючих напружень було побудовано відповідні епюри (рис. 3.11–3.17). При цьому для епюр уздовж твірної (рис. 3.11) початок координат приймався у верхній точці графітового шару, а для епюр уздовж стику (рис. 3.12) — на осі вузла. Криві пружного розрахунку наведені синім кольором, а пластичного — червоним.

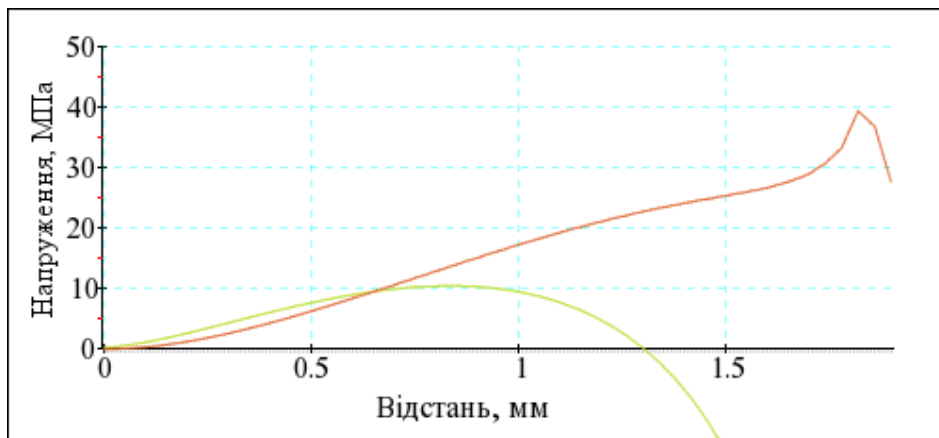
Аналіз епюр вздовж твірної (рис. 3.11) показує, що характер розподілу розтягуючих напружень є подібним для всіх розглянутих співвідношень товщин шарів. Напруження зростають від нуля у верхній точці шару до максимуму, який розташований на відстані 0,4–0,8 від його товщини. При цьому положення максимуму зміщується вниз зі збільшенням товщини графітового шару.

Величина максимальних напружень збільшується зі зростанням товщини графіту та зменшується при збільшенні товщини мідного шару. На рис. 3.13, а та 3.14, а видно, що при тонкому мідному шарі (2 мм) збільшення товщини графіту від 2 до 8 мм приводить до зростання максимальних розтягуючих напружень у п'ять разів — від 10 МПа до 50 МПа. У випадку товстого шару міді (8 мм) цей ефект значно слабший: напруження зростають лише вдвічі — від 10 МПа до 20 МПа.

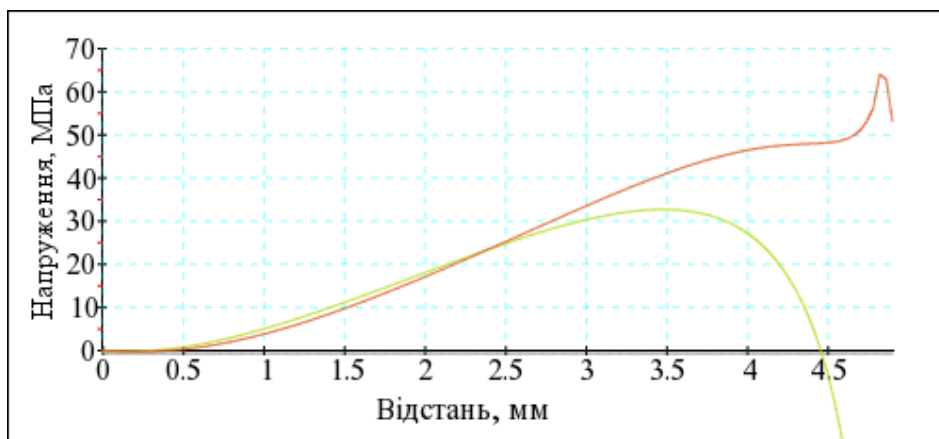
Пластичні деформації, що розвиваються в мідному шарі, знижують рівень напружень у міді, але водночас приводять до помітного збільшення розтягуючих напружень у графіті (червоні криві на рис. 3.11 та 3.12, б). Закономірність зростання напружень зі збільшенням товщини графіту зберігається, проте ступінь зростання

зменшується. При товщині міді 2 мм напруження в графіті зростають від 40 МПа (при товщині графіту 2 мм) до 75 МПа (при 8 мм), а при товщині міді 8 мм — від 65 до 80 МПа відповідно.

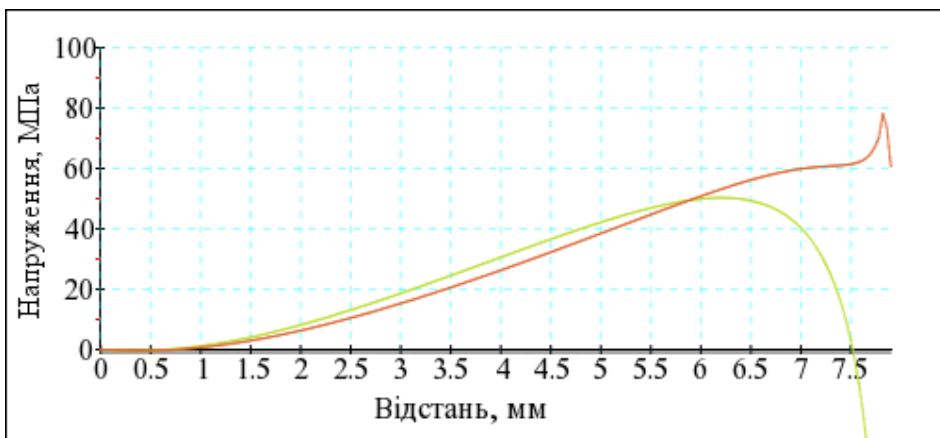
Епюри осьових напружень на межі поділу матеріалів (рис. 3.12) свідчать, що максимум напружень розміщується поблизу зовнішньої поверхні вузла та поступово зміщується до осі при збільшенні загальної висоти вузла. Рівень цих напружень також залежить від співвідношення товщин шарів, хоча характер залежності відрізняється від випадку поверхневих напружень (рис. 3.15). Так, при товщині міді 2 мм та збільшенні товщини графіту від 2 до 8 мм максимальні напруження змінюються незначно — від 15 МПа до 20 МПа, проходячи мінімум 12 МПа при товщині графіту 4 мм. Найбільш виражена зміна спостерігається при товщині міді 8 мм: тут напруження зростають від 20 МПа (при 2 мм графіту) до 40 МПа (при 7–8 мм графіту).



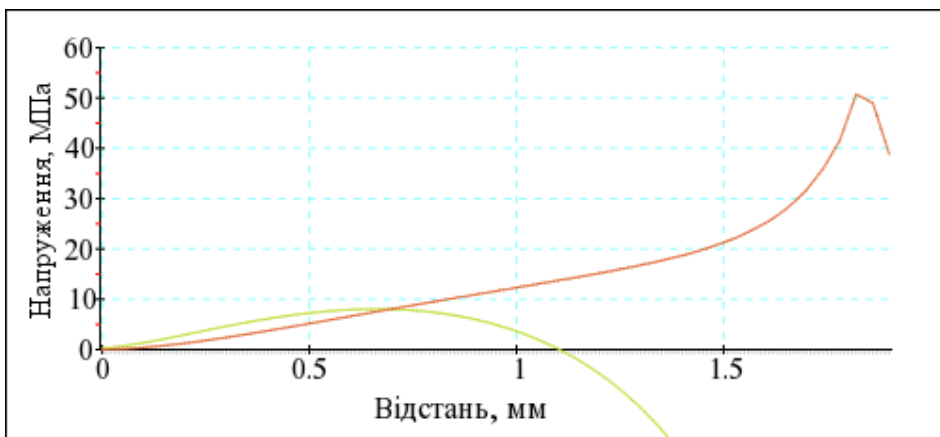
2+2



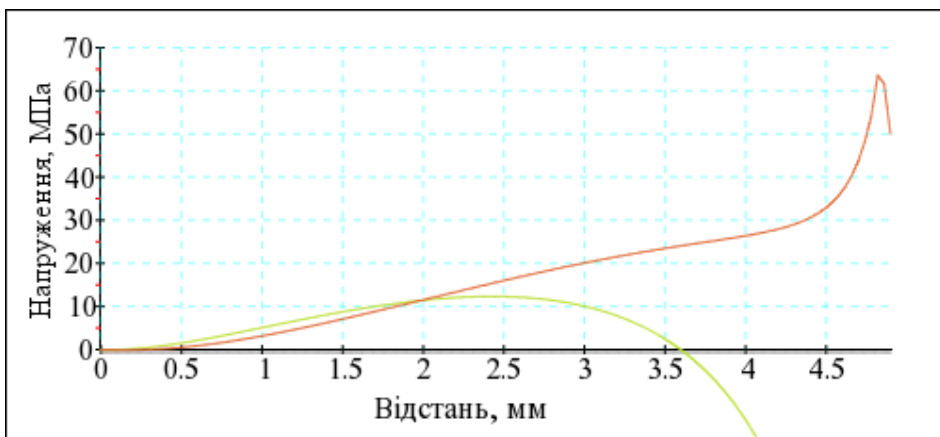
2+5



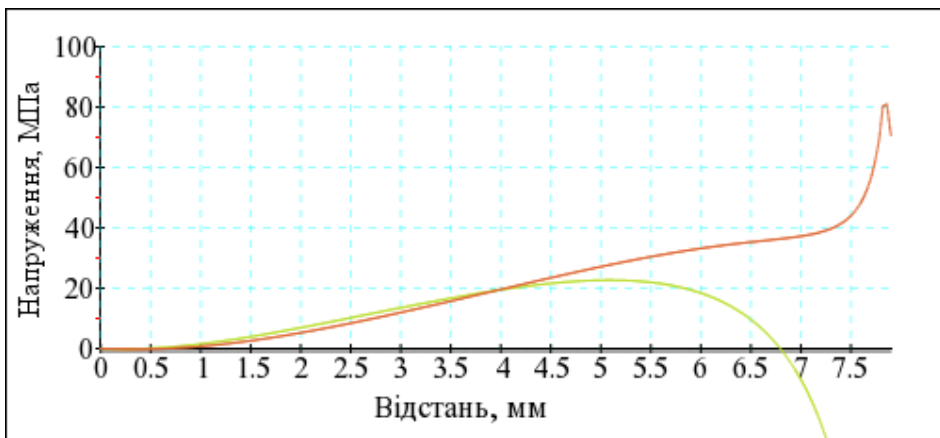
2+8



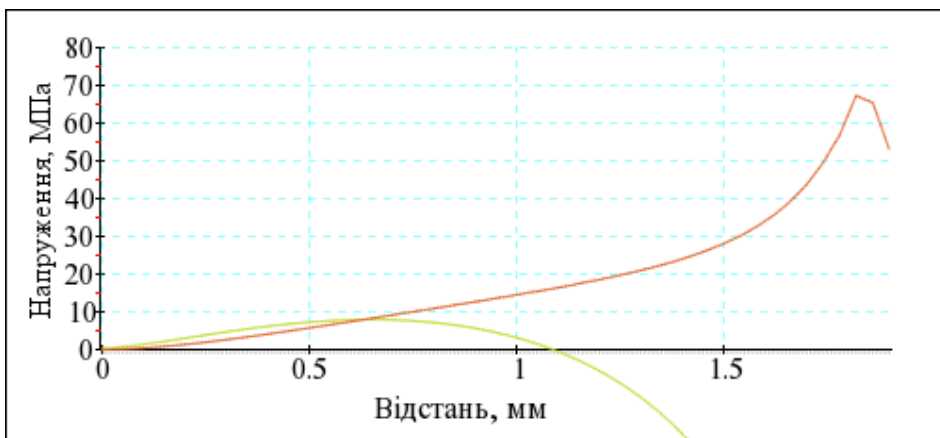
5+2



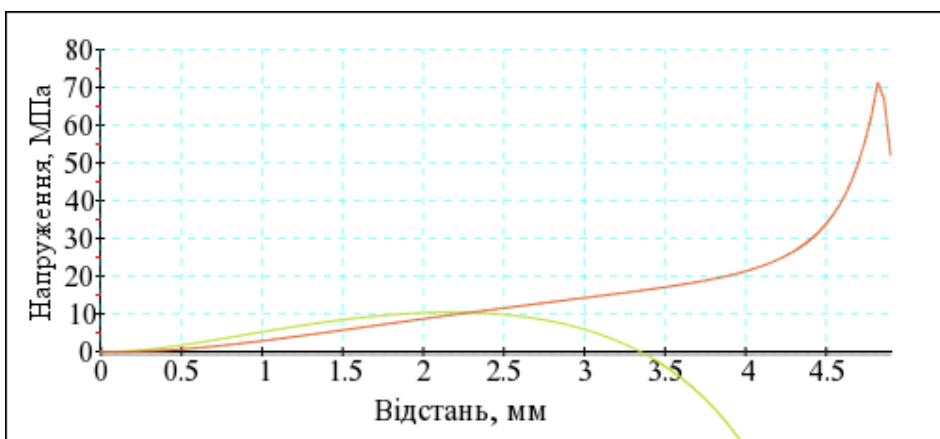
5+5



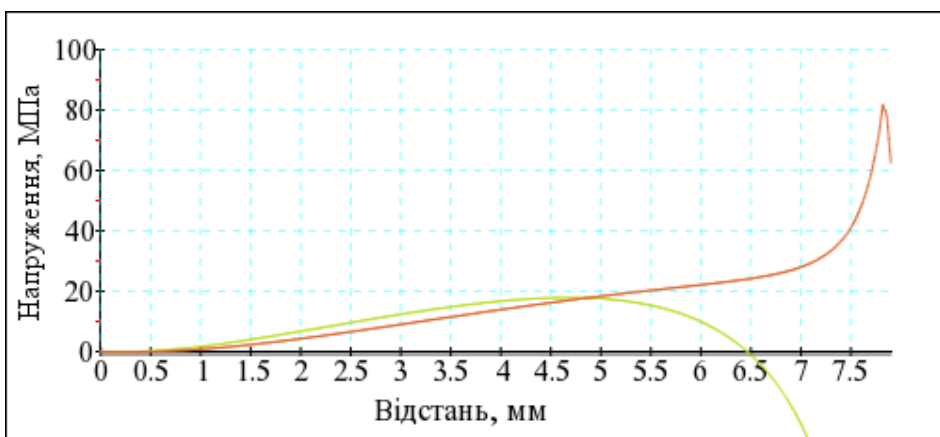
5+8



8+2



8+5

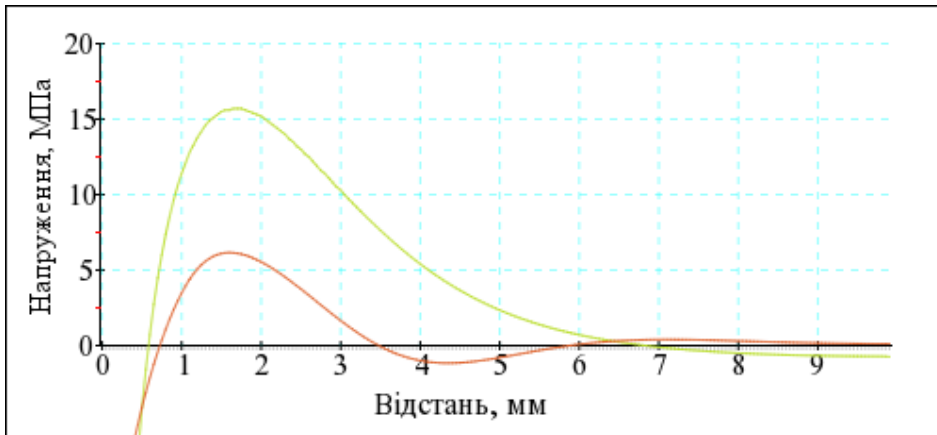


8+8

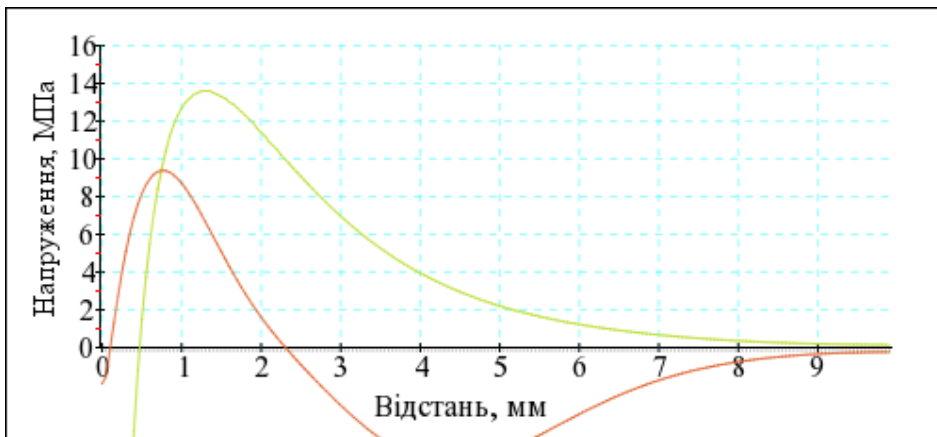
Рисунок 3.11. Епюри осьових розтягуючих напружень в графіті вздовж твірної: вар. 2 +2, 2 +5, 2 +8, 5 +2, 5 +5, 5 +8, 8 +2, 8 +5, 8 +8, в пружному (зелені) та пластичному (червоні) рішеннях

Пластичні деформації у мідному шарі суттєво підвищують рівень осьових розтягуючих напружень у стику — до 30...50 МПа при товщині графіту 2 мм та до 60...75 МПа при 8 мм. Водночас ці значення залишаються нижчими за максимальні напруження на циліндричній поверхні.

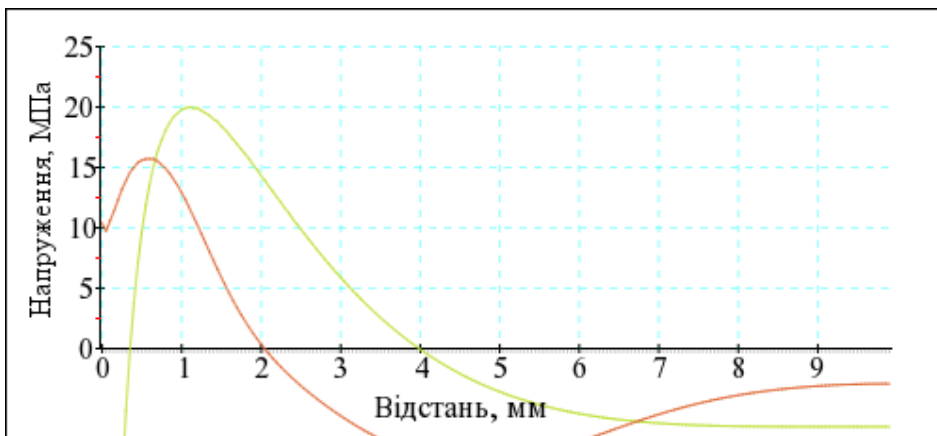
Таким чином, імовірність зародження руйнування в графітовому шарі є вищою на зовнішній поверхні вузла, ніж у зоні стику, і ця закономірність практично не залежить від співвідношення товщин шарів міді та графіту.



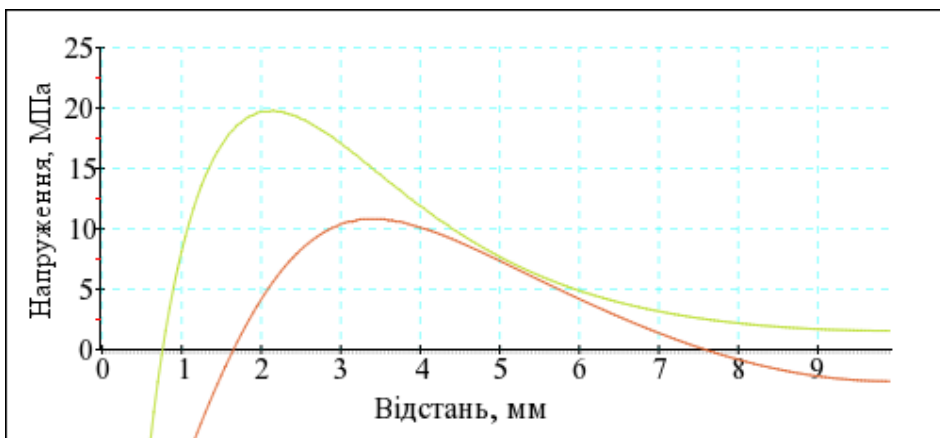
2+2



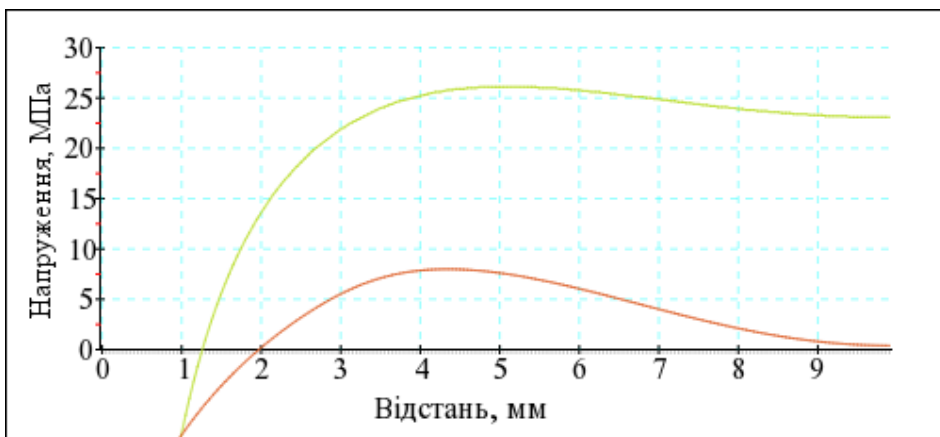
2+5



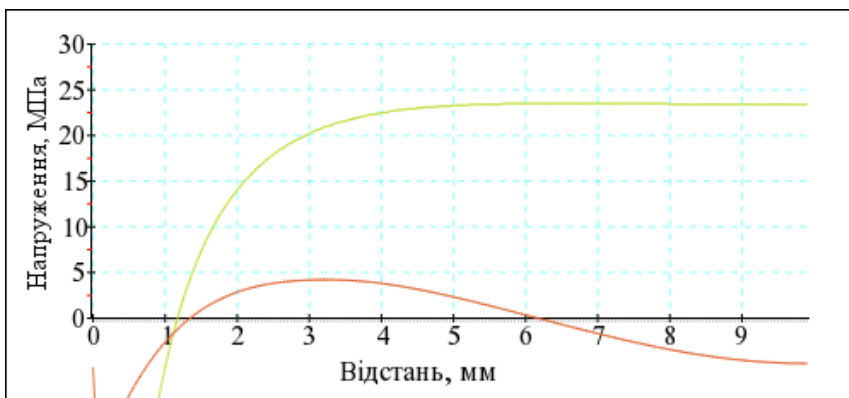
2+8



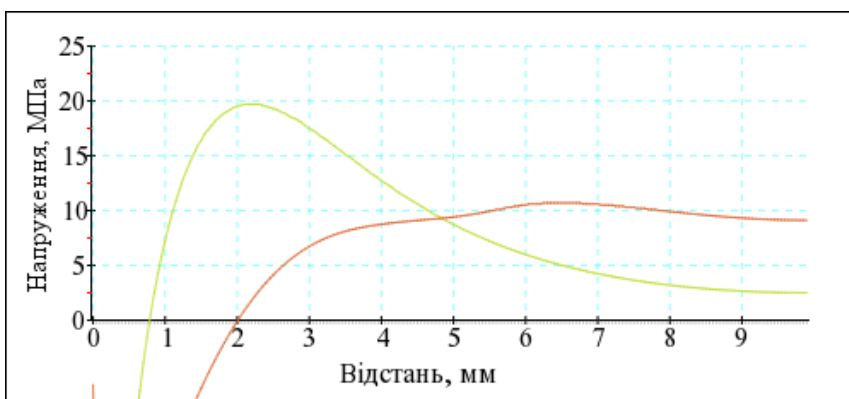
5+2



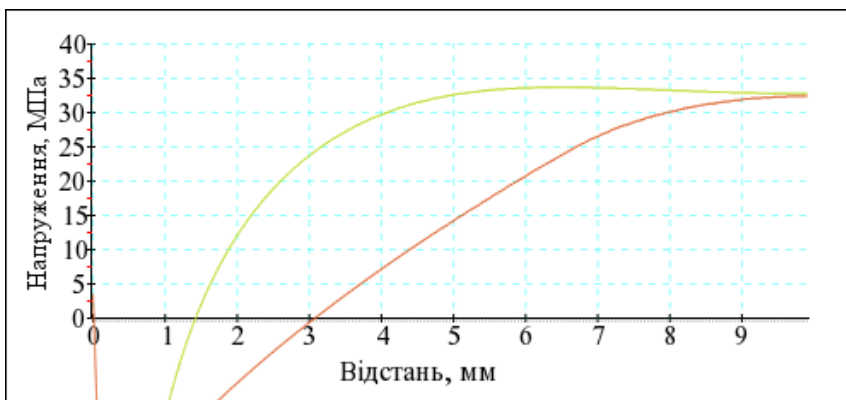
5+5



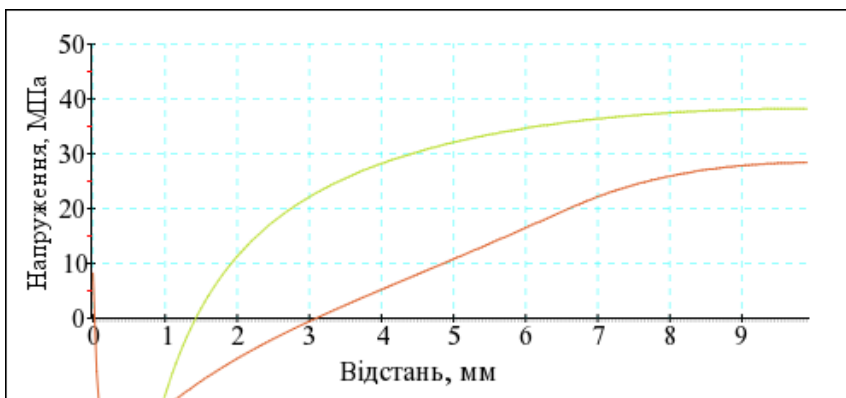
5+8



8+2

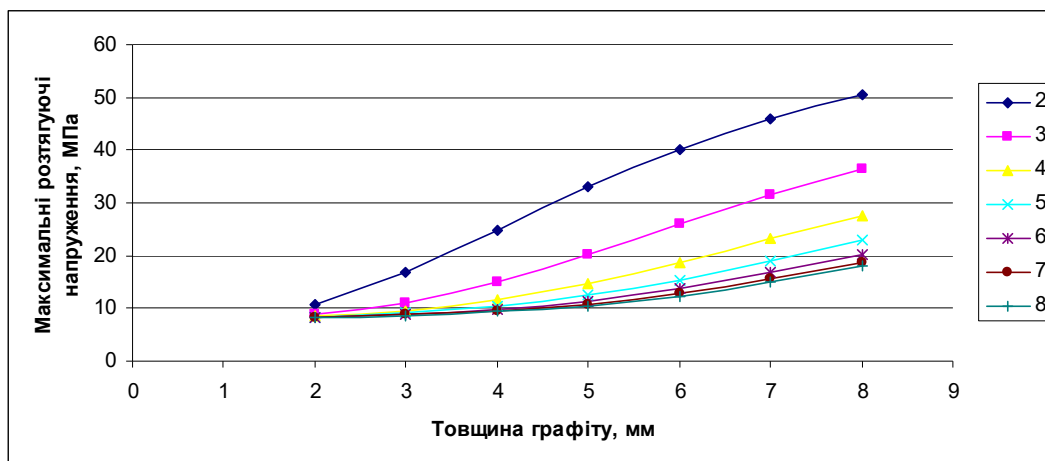


8+5

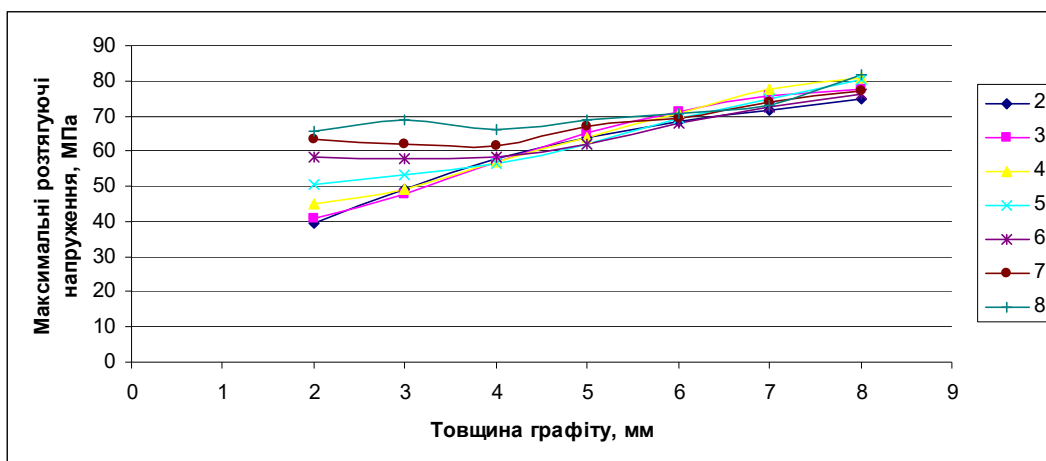


8+8

Рисунок 3.12. Епюри осевих розтягуючих напружень в графіті вздовж стику: вар. 2 +2, 2 +5, 2 +8, 5 +2, 5 +5, 5 +8, 8 +2, 8 +5, 8 +8, в пружному (сині) і пластичному (червоні) рішеннях

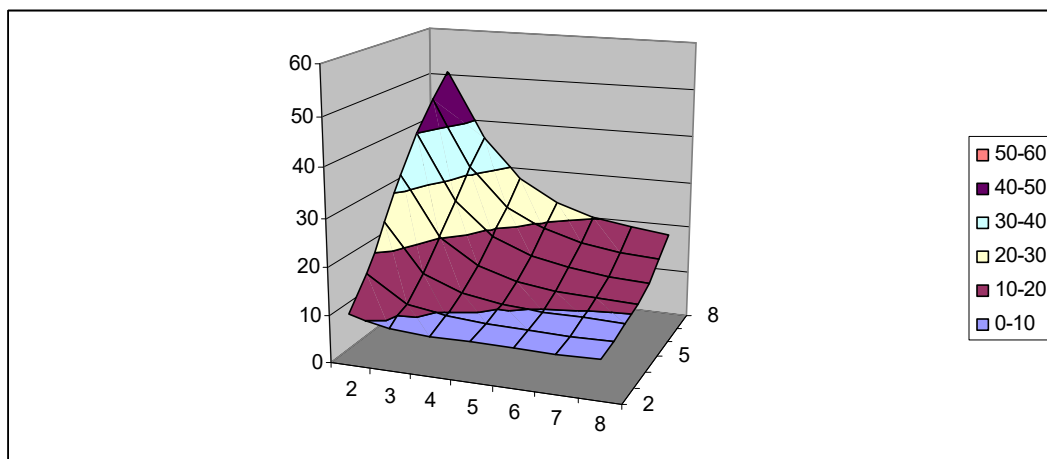


a

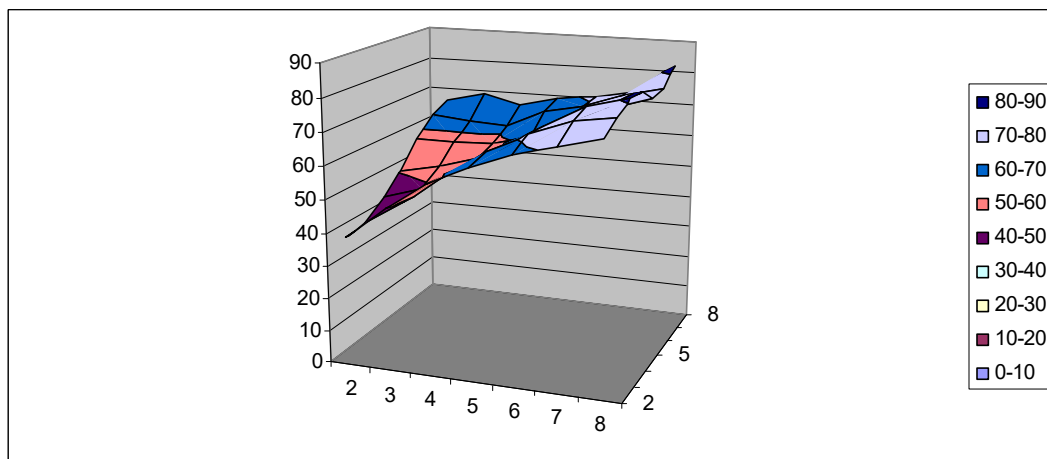


б

Рисунок 3.13. Залежність максимальних розтягуючих напружень на поверхні графіту від товщини графіту, пружна (а) і пластична (б) задача

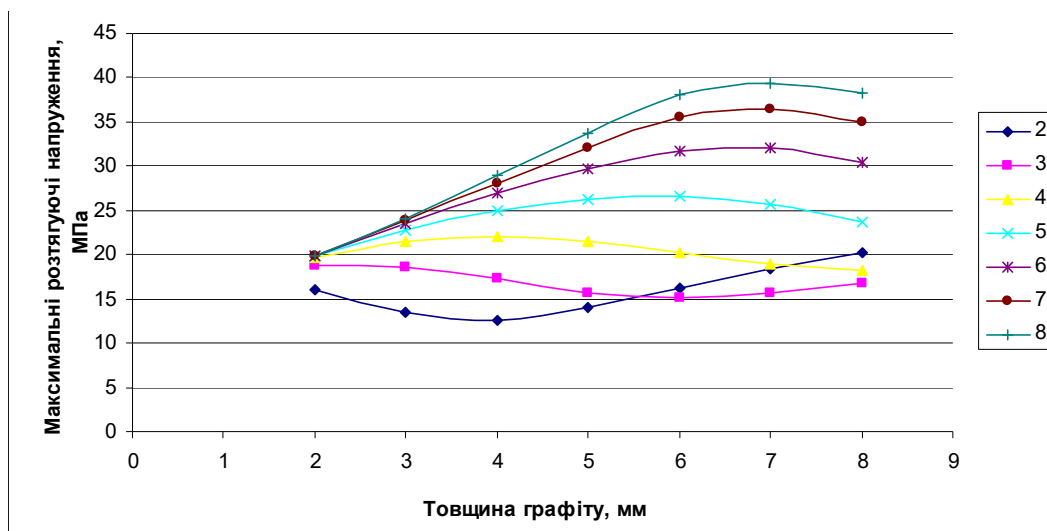


а

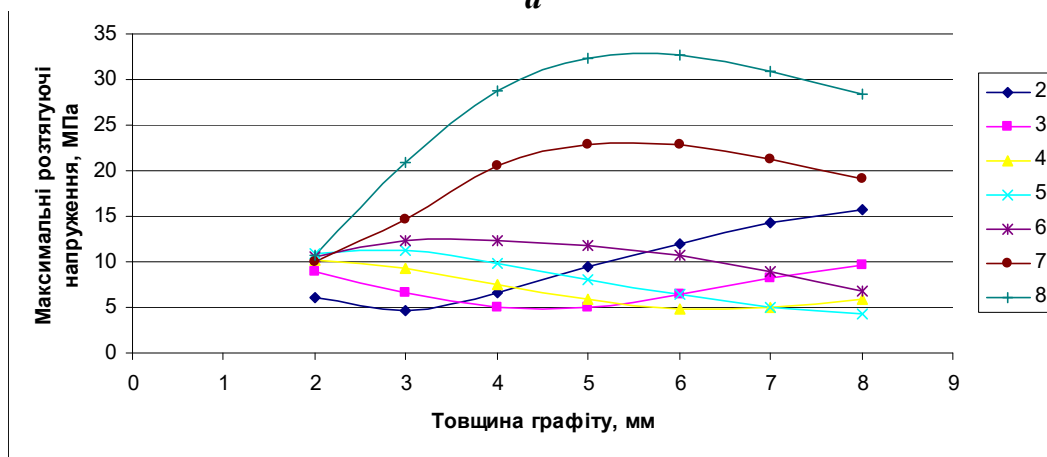


б

Рисунок 3.14. Залежність максимальних розтягуючих напружень на поверхні графіту від товщини шарів, пружна (а) і пластична (б) задача

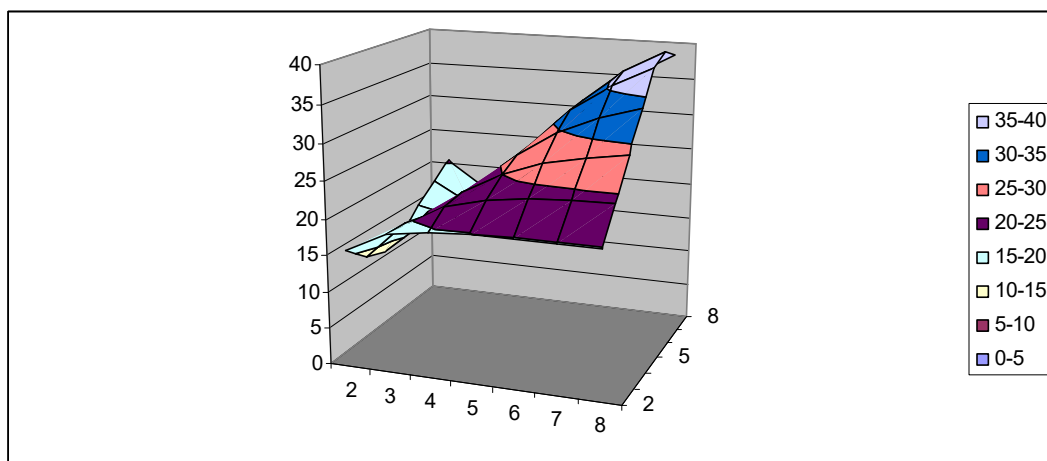


a

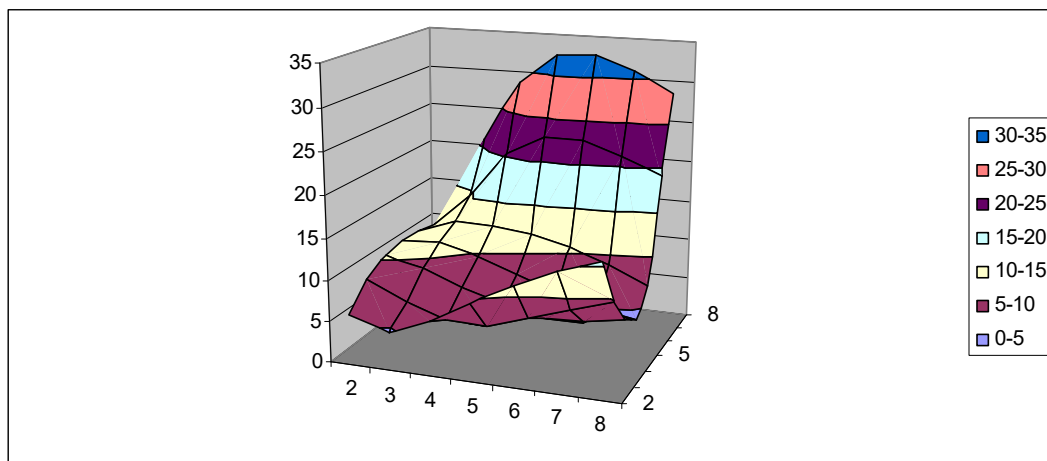


б

Рисунок 3.15. Залежність максимальних розтягуючих напружень по стику графіту від товщини шару графіту при різних товщинах міді, пружна (а) і пластична (б) задача

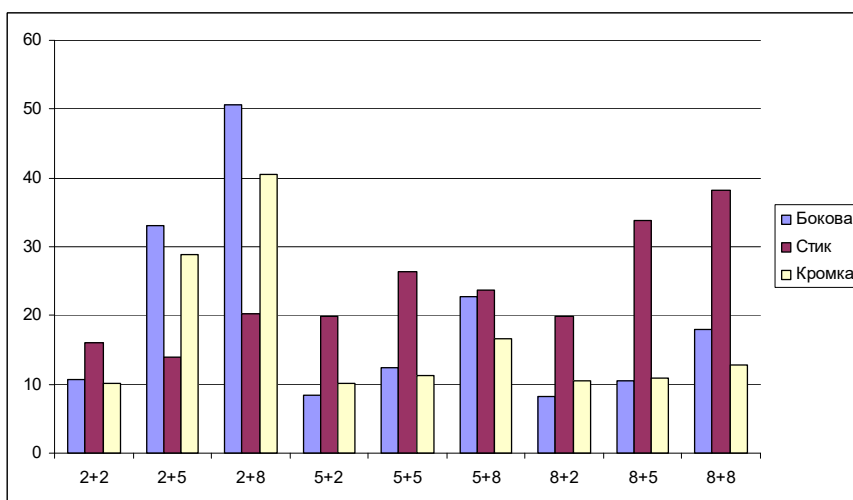


a

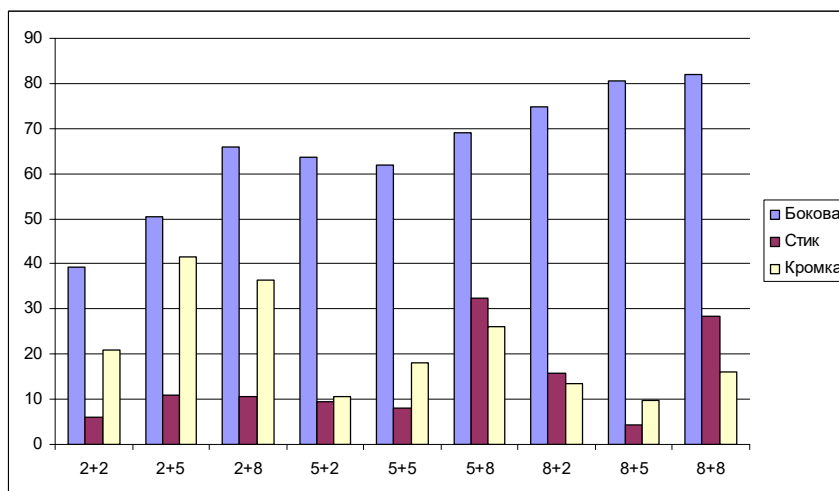


б

Рисунок 3.16. Залежність максимальних розтягуючих напружень на стику графіту і міді від товщини шарів, пружна (а) і пластична (б) задача



а



б

Рисунок 3.17. Порівняння максимальних напружень на бічній поверхні, по стику і по торцю графітового шару при різних варіантах поєднання товщини шарів, пружне (а) і пластичне (б) рішення

Висновки

1. Розтягуючі напруження в графітовому шарі, які можуть призвести до його руйнування після охолодження вузла, формуються переважно у трьох характерних зонах:

- на зовнішній циліндричній поверхні графіту;
- вздовж межі поділу з мідним шаром;
- на верхній торцевій поверхні, що спостерігається для окремих комбінацій товщин шарів.

2. Величина розтягуючих напружень та локалізація їх максимумів суттєво залежать від співвідношення товщин мідного та графітового шарів. Відповідно, змінюються ймовірність виникнення дефектів та характерні зони можливого руйнування.

3. При роботі матеріалу в пружній стадії найсприятливішими з погляду мінімізації напружень є варіанти зі малою товщиною графітового шару, а саме комбінації: 2+2 мм, 5+2 мм, 8+2 мм (графіт + мідь). У цих випадках рівень розтягуючих напружень у графіті залишається мінімальним, а ризик руйнування — найнижчим.

4. Найбільш несприятливими є варіанти, у яких товщина графітового шару суттєво перевищує товщину мідного — 2+8 мм та 2+5 мм. У цих комбінаціях спостерігається максимальний рівень розтягуючих напружень на поверхні графіту.

5. Пластичні деформації в мідному шарі суттєво впливають на напружений стан вузла:

- значно збільшують розтягуючі напруження на зовнішній циліндричній поверхні графіту,
- і зміщують точку максимального навантаження ближче до межі поділу матеріалів.

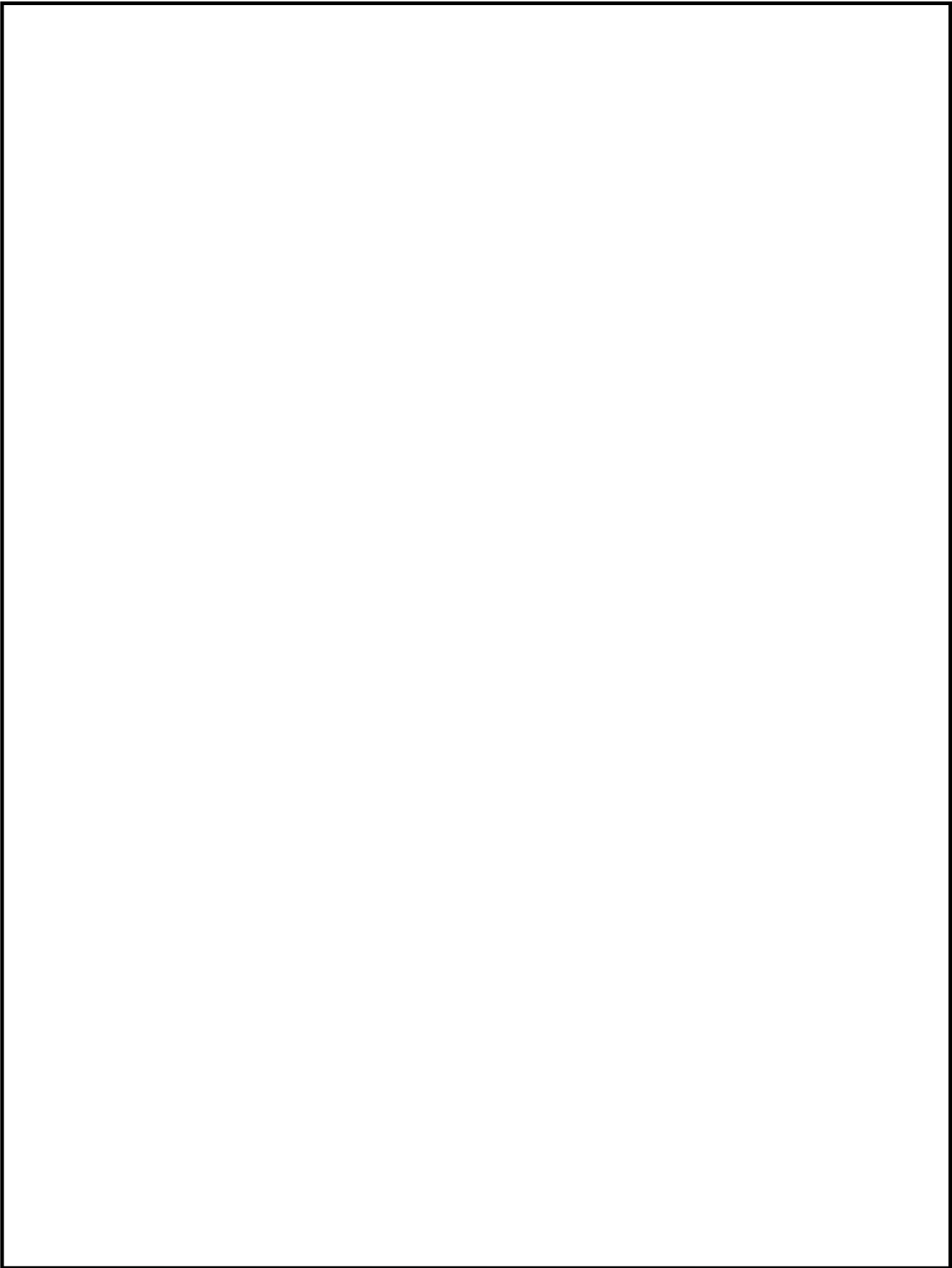
6. У зоні стику пластичні деформації, навпаки, сприяють зменшенню максимальних розтягуючих напружень у графітовому шарі — як вздовж межі поділу, так і на торцевій поверхні. Це знижує ймовірність руйнування в цих ділянках.

7. З урахуванням того, що у діапазоні високих температур домінують пластичні деформації, а при зниженні температури — пружні, можна очікувати наступний характер зародження пошкоджень:

– на ранній стадії охолодження найбільш імовірним є руйнування на бічній поверхні,

– на заключній стадії охолодження потенційні зони руйнування можуть зміщуватися залежно від геометрії вузла:

- на зовнішню поверхню (варіант 2+8 мм),
- на межу поділу (варіанти 5+5, 5+2, 8+2, 8+5, 8+8 мм),
- на торцеву поверхню (варіанти 2+2, 2+5, 5+8 мм).



					МР 8.132.6121зм.01.04.04 ПЗ									
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Вторинна переробка мідно-графітових вузлів				Літ.		Арк.	Аркуші		
Розробив	Красота Г.А.											69		
Перевірів	Матвієнко М.В.								ХННІ НУК					
Рецензент														
Н. Контр.	Матвієнко М.В.													
Зав. каф.	Матвієнко М.В.													

4. Вторинна переробка мідно-графітових вузлів

4.1. Доцільність вторинної переробки

Науково-технологічний прогрес сучасної цивілізації значною мірою спирається на інтенсивний розвиток системи вторинного ресурсокористування. Світова практика демонструє чітку закономірність: зі зростанням рівня економічного розвитку держави підвищується й частка вторинних ресурсів у загальному балансі ресурсоспоживання. Це зумовлено не лише технологічним удосконаленням виробничих процесів, а й потребою мінімізувати екологічні навантаження та забезпечити раціональне використання природних ресурсів.

Аналіз міжнародного досвіду комплексної переробки сировини, утилізації та рекуперації техногенних відходів свідчить про послідовний перехід до ресурсозберігаючої моделі природокористування. Науковою основою цієї моделі є концепція технологічно замкнутого циклу використання природної сировини, яка передбачає скорочення втрат матеріалів і енергії та мінімізацію утворення відходів. Реалізація принципів замкнутого циклу сприяє формуванню безвідходних територіально-виробничих комплексів із високим рівнем переробки та повторного використання ресурсів.

Перехід до інтенсивного типу розширеного відтворення виробництва об'єктивно вимагає впровадження технологій повного, повторного й багаторазового використання сировини, залученої в господарський оборот. Такий підхід забезпечує не лише стабілізацію, а з часом і зменшення обсягів первинного ресурсоспоживання, що має особливе значення в умовах глобального виснаження природних запасів та зростання антропогенного навантаження на довкілля.

Отже, вторинне ресурсокористування стає довгостроковою стратегічною основою розвитку світового господарства. Воно формує передумови для сталого економічного зростання як окремих держав, так і міжнародної спільноти загалом, виступаючи не лише механізмом економії ресурсів, а й ключовим елементом сучасної екологічної та технологічної політики.

4.2. Переробка мідного брухту

На сучасному етапі значного розвитку набула технологія переробки мідного брухту, оскільки мідь належить до матеріалів із практично повною відновлюваністю. Коефіцієнт використання міді як вторинної сировини наближається до 100%, а частка продукції, виготовленої саме з мідного брухту, становить близько 40% від загального обсягу виробництва мідної продукції. Одним із найпоширеніших напрямів вторинного використання міді є переробка брухту у мідну катанку, що виступає основною сировиною для виробництва кабельної продукції та електропровідників.

Найбільш розповсюдженою промисловою технологією виготовлення катанки є лінії безперервного лиття та прокатки (CCR — Continuous Casting and Rolling). Цей процес забезпечує високу продуктивність, стабільну якість готової продукції та дає змогу використовувати широкий спектр мідної сировини, включаючи вторинні ресурси.

Нормативна база для мідної катанки поки що не є повністю уніфікованою: національного ГОСТ на катанку не існує, проте застосовуються різноманітні технічні умови (ТУ). Мідна катанка випускається трьох класів — А, В і С — з діаметром від 8 до 18 мм. Як вихідну сировину використовують марки міді М1, М0 та М00 згідно з вимогами ГОСТ 859–2001, який регламентує хімічний склад та фізико-механічні властивості металу.

Класична технологічна схема виробництва мідної катанки включає такі основні етапи:

Завантаження та підготовка мідного брухту.

Плавлення металу у відбивних або індукційних печах.

Вогневе рафінування, спрямоване на видалення домішок.

Виливок анодів та електролітичне рафінування, що забезпечує отримання катодної міді високої чистоти.

Переплавлення катодів та формування заготовки.

Безперервне лиття та прокатка у катанку заданого діаметра.

Використання сучасного високотехнологічного обладнання та європейських схем рафінування дозволяє суттєво оптимізувати виробничий процес. Зокрема, застосування вдосконалених плавилисьно-рафінувальних систем дає змогу завантажувати у піч шихту з мінімальним вмістом міді не нижче 92%. При цьому електроліз та повторне переплавлення катодів можуть бути виключені з технологічного ланцюга. Це забезпечує можливість:

- скоротити тривалість виробничого циклу у декілька разів;
- зменшити енерговитрати;
- знижити собівартість кінцевої продукції;
- підвищити екологічну ефективність виробництва.

Таким чином, сучасні методи переробки мідного брухту гарантують високу продуктивність, економічність та екологічність виробництва. Це визначає їхню ключову роль у системі вторинного ресурсокористування та забезпечує подальший розвиток кабельної промисловості.

4.3. Переробка графіту

Графіт є однією з найважливіших видів промислової сировини, використання якої охоплює широкий спектр галузей техніки. У чорній металургії він слугує основним матеріалом для виготовлення електродів електросталеплавильних та феросплавних печей, тиглів для плавлення сталі й кольорових металів. У ливарному виробництві графіт входить до складу протипригарних присипок, графіто-колоїдних фарб і графіто-керамічних мас, які застосовують для формувальних композицій. В електротехнічній промисловості його використовують у гальванічних елементах, лужних акумуляторах та щіткових вузлах електродвигунів. Особливу роль графіт відіграє в атомній енергетиці як матеріал для стрижнів-сповільнювачів нейтронів, а також у ракетно-космічній техніці — як високотемпературостійкий конструкційний матеріал.

У машинобудуванні графіт застосовується як порошковий мастильний матеріал та як компонент металокерамічних композицій. Крім того, він є вихідною сировиною для виробництва штучних алмазів, пластмас, антистатичних добавок, а

також широко використовується у виготовленні олівців. Завдяки багатофункціональності та розширенню високотехнологічних галузей світовий попит на графіт стабільно зростає.

Графітовмісні природні руди, що є основним джерелом природного графіту, характеризуються низьким вмістом цільного компонента: для отримання 1 т товарного продукту необхідно переробити до 20 т руди. У промисловості також застосовують штучний графіт, що виготовляється з нафтового коксу та антрациту, проте його виробництво є більш енергоємним та дорогим. У зв'язку з цим графітова пил чорної металургії, що утворюється як побічний продукт, розглядається як перспективна вторинна сировина. Її ресурси оцінюються у мільйони тонн, а значна частина накопичується у відвалах, створюючи екологічні ризики через можливість рознесення пилу вітром на великі відстані.

Нині сформовано два основні напрями утилізації графітової пилу.

Перший напрям передбачає її переробку безпосередньо на підприємствах, де вміст графіту у пилу становить 60–90%. Технологічна схема включає подрібнення, флотаційне збагачення за стандартними методиками та хімічну доведеність концентрату. Отриманий продукт може бути використаний у власному виробничому циклі підприємства.

Другий напрям полягає у збагаченні графітової пилу на металургійних підприємствах з подальшою переробкою концентрату на спеціалізованих графітових заводах спільно з природною рудою. Досвід показує, що графіт, отриманий у такий спосіб, не поступається за якістю продукту, виробленому з природної сировини, а іноді навіть перевершує його.

Графітова пил із вмістом графіту менше 60% також може ефективно використовуватися у ливарному виробництві, зокрема для приготування теплоізоляційних сумішей. Такий підхід забезпечує комплексне використання вторинної ресурсної бази та сприяє зменшенню техногенного навантаження на довкілля.

Загальні висновки

1. Однією з ключових проблем формування нероз'ємних з'єднань методами паяння або дифузійного зварювання між матеріалами з істотно різними фізико-механічними властивостями (зокрема системами метал–кераміка або метал–графіт) є виникнення залишкових напружень та забезпечення цілісності вузла після охолодження. Саме залишкові напруження визначають працездатність з'єднання та його довговічність.

2. Рівень залишкових напружень у з'єднанні формується під впливом низки матеріалознавчих чинників, серед яких найважливішими є:

- різниця коефіцієнтів лінійного термічного розширення;
- співвідношення модулів пружності матеріалів;
- величина границі плинності та характер деформаційних властивостей при температурах процесу.

3. Важливий вплив на напружено-деформований стан мають також конструктивні параметри вузла, зокрема співвідношення товщин шарів матеріалів, що з'єднуються. Незважаючи на очевидну значущість цього фактора, він досліджений недостатньо, що й зумовлює актуальність проведеного аналізу.

4. У графітовому елементі після охолодження формуються небезпечні розтягувальні залишкові напруження, які можуть призвести до руйнування. Дослідження показує, що максимальні напруження виникають у трьох характерних зонах:

- на зовнішній циліндричній поверхні графітового шару;
- на межі розділу графіт–мідь;
- на верхній торцевій поверхні графітового шару.

Величина напружень у кожній із зон істотно залежить від співвідношення товщин з'єднуваних шарів.

5. З точки зору мінімізації розтягувальних напружень у пружній постановці оптимальними є комбінації товщин 2 + 2 мм, 5 + 2 мм та 8 + 2 мм, тобто варіанти з відносно невеликою товщиною графітового шару. Найбільш несприятливими є

конфігурації 2 + 8 мм, 8 + 8 мм, 8 + 5 мм та 2 + 5 мм, у яких графітовий шар значно перевищує мідний за товщиною.

6. Пластичні деформації в мідному шарі істотно впливають на перерозподіл напружень у вузлі. Вони:

- збільшують максимальні розтягувальні напруження на зовнішній бічній поверхні графіту;
- зміщують зону максимуму напружень ближче до межі контакту матеріалів;
- одночасно знижують рівень небезпечних напружень як на межі розділу, так і на торцевій поверхні графітового шару, зменшуючи ймовірність руйнування в цих ділянках.

7. З урахуванням того, що при високих температурах переважають пластичні деформації, а при низьких — пружні, ймовірність руйнування змінюється протягом охолодження вузла. На початковій стадії (високі температури) найбільш небезпечними є ділянки зовнішньої бічної поверхні графіту. На завершальній стадії охолодження зона максимального ризику може розташовуватися як на зовнішній поверхні, так і на межі графіт–мідь.

Література

1. Kou S. Welding Metallurgy. — New Jersey: Wiley, 2003. — 478 p.
2. Lippi V., Felli F. Dissimilar Metal Welding: State of the Art // Materials Performance. — 2018. — Vol. 57, No. 6. — P. 12–19.
3. Lienert T., Stellwag W., Grimmett B., Warke R. Friction Stir Welding and Processing. — Materials Park, OH: ASM International, 2010. — 320 p.
4. Messler R. W. Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology. — Amsterdam: Elsevier, 2004. — 816 p.
5. Kah P., Suoranta R., Martikainen J. Friction Stir Welding of Dissimilar Metals // International Journal of Materials Engineering Innovation. — 2013. — Vol. 4, No. 3–4. — P. 197–216.
6. Chen C., Kovacevic R. Joining of Dissimilar Materials // Journal of Materials Processing Technology. — 2004. — Vol. 151, No. 3. — P. 1–9.
7. Davis J. R. Aluminum and Aluminum Alloys. — Materials Park, OH: ASM International, 1993. — 784 p.
8. Potluri R., Dulikravich G. Design of Transition Joints for Dissimilar Metal Welding // Materials & Design. — 2011. — Vol. 32, No. 10. — P. 4931–4940.
9. Brandt R. Cryogenic Engineering Materials. — Berlin: Springer, 2013. — 362 p.
10. Bay N., Petersen C. Cold Pressure Welding // Welding Journal. — 2000. — Vol. 79, No. 5. — P. 151–157.
11. Kim J., Lee S. Electrical and Mechanical Reliability of Cu–Al Dissimilar Metal Joints // Materials Science and Engineering A. — 2011. — Vol. 528, No. 3. — P. 877–885.
12. Luo Y., Zhao H. Dissimilar metal welding: principles and challenges // Materials & Design. — 2020.
13. Kou S. Welding Metallurgy. — 2nd ed. — Hoboken : Wiley, 2003. — 478 p.
14. Messler R. W. Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology. — Amsterdam: Elsevier, 2004. — 816 p.
15. Mohammed G. R., et al. Dissimilar welding review // Journal of Manufacturing Processes. — 2019. — Vol. 45. — P. 654–676.

16. Bay N., et al. Cold-welding mechanisms // Wear. — 2018. — Vol. 410–411. — P. 1–12.
17. Azushima A., et al. Advances in cold welding processes // CIRP Annals. — 2017. — Vol. 66, No. 2. — P. 785–808.
18. Givi M. K. B., Asadi P. Advances in Friction Stir Welding and Processing. — Cambridge: Woodhead Publishing, 2014. — 776 p.
19. Elmer J. W., et al. Fundamentals of diffusion bonding // Metallurgical Transactions. — 2016. — Vol. 47A. — P. 1221–1234.
20. Liu Y., et al. Diffusion bonding of dissimilar materials // Materials Science Forum. — 2015. — Vol. 806. — P. 123–130.
21. Kraus H. Capacitor Discharge Welding Principles. — Berlin: Springer, 2012. — 249 p.
22. Deribas A. High-speed impact welding // Welding International. — 2015. — Vol. 29, No. 4. — P. 284–292.
23. Singh R., et al. Ultrasonic metal welding // Journal of Materials Engineering. — 2021. — Vol. 12. — P. 87–102.
24. Crossland B. Explosive Welding: Principles and Applications. — Oxford: Oxford University Press, 1982. — 268 p.
25. Miyazaki T. Micro-resistance welding for electronics // Welding Journal. — 2019. — Vol. 98, No. 7. — P. 211–219.
26. Psyk V., et al. Electromagnetic pulse welding // Journal of Materials Processing Technology. — 2011. — Vol. 211, No. 5. — P. 826–837.
27. Kalenda P. Wetting and mixing behavior in dissimilar welding // Welding Research. — 2020. — Vol. 94. — P. 341–356.
28. Olsen F. Arc Welding of Dissimilar Metals. — Boca Raton: CRC Press, 2018. — 352 p.
29. Lancaster J. F. The Physics of Welding. — Oxford: Pergamon Press, 1986. — 356 p.
30. Rao K. P. Overheated metal jet welding // Surface Engineering. — 2017. — Vol. 33, No. 10. — P. 805–812.

31. Sreeraj R. Dual-electrode arc systems for low-dilution surfacing // Materials Performance. — 2022. — Vol. 61, No. 3. — P. 58–67.
32. Kou S. Welding metallurgy. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2003. 478 p.
33. Messler R. W. Joining of materials and structures. Amsterdam : Elsevier, 2004. 791 p.
34. Luo Y., Zhao H. Dissimilar metal welding: principles and challenges. Materials & Design, 2020, vol. 194, p. 108–128.
35. Mohammed G. R., Ishak M., Abas S. K. et al. Dissimilar welding review. Journal of Manufacturing Processes, 2019, vol. 45, pp. 559–603.
36. Bay N., Azushima A., Groche P. et al. Cold welding mechanisms. Wear, 2018, vol. 396–397, pp. 163–175.
37. Azushima A., Kopp R., Korhonen A. et al. Advances in cold welding processes. CIRP Annals, 2017, vol. 66, iss. 2, pp. 749–772.
38. Givi M. K. B., Asadi P. Advances in friction stir welding. Oxford : Woodhead Publishing, 2014. 450 p.
39. Elmer J. W., Terrill P. B., Palmer T. A. et al. Fundamentals of diffusion bonding. Metallurgical Transactions, 2016, vol. 47A, pp. 1203–1218.
40. Liu Y., Wang H., Li M. et al. Diffusion bonding of dissimilar materials. Materials Science Forum, 2015, vol. 816, pp. 25–35.
41. Crossland B. Explosive welding principles and applications. Oxford : Clarendon Press, 1982. 252 p.
42. Singh R., Kumar S., Verma R. K. et al. Ultrasonic metal welding. Journal of Materials Engineering, 2021, vol. 48, pp. 211–229.
43. Miyazaki T. Micro-resistance welding for electronics. Welding Journal, 2019, vol. 98, pp. 53–60.
44. Kou S. Welding metallurgy. 2nd ed. Hoboken : Wiley, 2003. 478 p.
45. Messler R. W. Joining of materials and structures. Amsterdam : Elsevier, 2004. 791 p.
46. Luo Y., Zhao H. Dissimilar metal welding: principles and challenges. Materials & Design, 2020, vol. 194, pp. 108–128.

47. Mohammed G. R., Ishak M., Abas S. K. et al. Dissimilar welding review. Journal of Manufacturing Processes, 2019, vol. 45, pp. 559–603.
48. Bay N., Azushima A., Groche P. et al. Cold welding mechanisms. Wear, 2018, vol. 396–397, pp. 163–175.
49. Azushima A., Kopp R., Korhonen A. et al. Advances in cold welding processes. CIRP Annals, 2017, vol. 66, iss. 2, pp. 749–772.
50. Kou S. Welding metallurgy. 2nd ed. Hoboken : Wiley, 2003. 478 p.
51. Messler R. W. Joining of materials and structures. Amsterdam : Elsevier, 2004. 791 p.
52. Luo Y., Zhao H. Dissimilar metal welding: principles and challenges. Materials & Design. 2020, vol. 194, pp. 108–128.
53. Mohammed G. R., Ishak M., Abas S. K. et al. Dissimilar welding review. Journal of Manufacturing Processes. 2019, vol. 45, pp. 559–603.
54. Bay N., Azushima A., Groche P. et al. Cold welding mechanisms. Wear. 2018, vol. 396–397, pp. 163–175.
55. Azushima A., Kopp R., Korhonen A. et al. Advances in cold welding processes. CIRP Annals. 2017, vol. 66, pp. 749–772.
56. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. The finite element method. 5th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2000. 689 p.
57. Oden J. T. Finite elements: An introduction. New York : Wiley, 1972. 441 p.
58. Gallagher R. H. Finite element analysis: Fundamentals. Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1975. 425 p.
59. Clough R. W. The finite element method: A review. Journal of the Structural Division, 1960, vol. 86, no. 6, pp. 1–23.
60. Bathe K.-J. Finite element procedures. Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1996. 1037 p.
61. Segerlind L. J. Applied finite element analysis. New York : Wiley, 1984. 427 p.
62. Cook R. D., Malkus D. S., Plesha M. E., Witt R. J. Concepts and applications of finite element analysis. 4th ed. New York : Wiley, 2001. 719 p.
63. 1013. Washington, DC : NASA, 1972. 409 p.

64. Siemens PLM Software. NX Nastran — User's Guide. Plano, TX : Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., 2019. 1780 p.
65. Hallquist, J. O. LS-DYNA Theory Manual. Livermore : Livermore Software Technology Corporation, 2018. 1632 p. ISBN 978-0-9995121-0-4.
66. MSC Software. ADAMS — Multibody Dynamics Simulation User Guide. Newport Beach : MSC Software Corporation, 2016. 1250 p.
67. CD-Adapco. STAR-CD Methodology and User Guide. London : CD-Adapco, 2014. 980 p. ISBN 978-1-85844-123-7.
68. PTC. Creo Simulate / Pro/Engineer Mechanical User Manual. Boston : PTC Inc., 2017. 842 p.
69. Dassault Systèmes. ABAQUS Analysis User's Manual. Version 2020. Providence, RI : Dassault Systèmes Simulia Corp., 2020. 2456 p. ISBN 978-1-60495-980-4.
70. Moaveni, S. Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS. 4th ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2015. 928 p. ISBN 978-0-13-384080-3.
71. Mäkelä, T., Stein, E. Engineering Analysis with ANSYS Software. Cham : Springer, 2018. 347 p. (Engineering Materials). ISBN 978-3-319-64368-9.
72. Ferziger, J. H., Perić, M., Street, R. L. Computational Methods for Fluid Dynamics. 4th ed. Cham : Springer, 2019. 440 p. ISBN 978-3-319-99694-6.
73. ANSYS Inc. ANSYS User's Guide. Canonsburg, PA : ANSYS Inc., 2020. — (без ISBN). — 2100 p.
74. Bathe, K. J. Finite Element Procedures. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2006. 1036 p. ISBN 978-0-9790049-0-2.
75. Pasternak, E., Dyskin, A. Advanced Parametric Modelling in ANSYS. Hoboken : Wiley, 2017. 272 p. ISBN 978-1-119-37592-8.
76. Dassault Systèmes. Multiphysics Simulation and Coupled Analysis Methods. Paris : Dassault Systèmes, 2021. — (без ISBN). — 512 p.
77. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM Handbook. Vol. 2. — Materials Park, OH: ASM International, 1990. — 1328 p. — ISBN 978-0-87170-378-1.