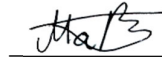


НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА
ХЕРСОНСЬКИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра зварювання

«Допущений до захисту»

В.о. завідувача кафедри



к.т.н., доцент М.В. Матвієнко

«__» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістра»

на тему: Конструктивна оптимізація іонно-плазмового катода для напилення тугоплавких металів на основі результатів дослідження напруженого стану

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

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)



Барабаш Микола Сергійович

(прізвище та ініціали)

Керівник

Матвієнко Максим Валентинович

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Лабарткава Андрій Володзьорович

(прізвище та ініціали)

Миколаїв-Херсон - 2024 р.

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут

Факультет _____ суднобудівний _____

Кафедра _____ зварювання _____

Освітній рівень _____ магістр _____

Спеціальність _____ 132 Матеріалознавство _____

(шифр і назва)

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

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

“ _____ ” _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ

Барабаш Микола Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Конструктивна оптимізація іонно-плазмового катода для наплення тугоплавких металів на основі результатів дослідження напруженого стану

керівник проекту Матвієнко Максим Валентинович, доцент, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені розпорядженням ХННІ НУК від _____.10.2024 року № _____

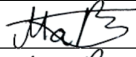
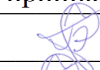
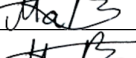
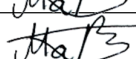
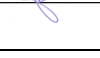
2. Строк подання студентом проекту 14.12 2024 р.

3. Вихідні дані до проекту Матеріал: тугоплавкі матеріали та їх лігатура (ніобій, тантал, молібден, цирконій), мідь.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз способів з'єднання різнорідних матеріалів та дослідження напружено-деформованого стану з'єднань; методика проведення досліджень; дослідження напружено-деформованого стану при з'єднанні міді з тугоплавким матеріалом в пружному стані, з врахуванням миттєвої пластичності, з врахуванням деформації повзучості при охолодженні з тиском та витримкою; розробка технології виготовлення катода

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Загальний вигляд вузла катода, фізико-механічні властивості, мета й задачі роботи; варіанти конструкції досліджених вузлів, поля максимальних напружень, рівень максимальних напружень у тугоплавкому матеріалі, результати моделювання.

6. Консультанти розділів проекту

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

7. Дата видачі завдання _____. 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз способів з'єднання різнорідних матеріалів та дослідження напружено-деформованого стану з'єднань; методика проведення досліджень;	28.10.2024р.	
2	Методика проведення досліджень	04.11.2024р.	
3	Дослідження напружено-деформованого стану при з'єднанні міді з тугоплавким матеріалом в пружному стані;	11.11.2024р.	
4	Дослідження напружено-деформованого стану при з'єднанні міді з тугоплавким матеріалом з врахуванням миттєвої пластичності;	18.11.2024р.	
5	Дослідження напружено-деформованого стану при з'єднанні міді з тугоплавким матеріалом з врахуванням деформації повзучості при охолодженні з тиском та витримкою	25.11.2024р.	
6	Розробка технології виготовлення катоду	28.11.2024р.	
7	Графічна частина	04.12.2024р.	
8	Оформлення пояснювальної записки	05.12.2024р.	

Студент


(підпис)

Барабаш М.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

Матвієнко М.В.

(прізвище та ініціали)

Зміст

ВСТУП	3
1. АНАЛІЗ СПОСОБІВ З'ЄДНАННЯ РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ З'ЄДНАНЬ	6
1.1 Спеціальні способи зварювання тиском	6
1.2 Власні напруження при з'єднанні різномірних матеріалів	8
1.3 Методи розрахунку напружено-деформованого стану різномірних матеріалів в умовах пружності та миттєвої пластичності	10
1.4. Вибір програмного комплексу для моделювання напружено-деформованого стану	12
Висновки, постановка мети і завдання досліджень	14
2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	18
2.1. Досліджені матеріали	18
2.2. Варіанти конструкції катода для іонно-плазмового напilenня	21
2.3. Вибір методу з'єднання та припою	23
2.4. Сутність методу кінчених елементів	26
2.5 Програмний комплекс ANSYS	28
Висновки	Помилка! Закладку не визначено.
3. ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ З'ЄДНАННІ МІДІ З ТУГОПЛАВКИМ МАТЕРІАЛОМ В ПРУЖНОМУ СТАНІ	31
3.1. Дослідження конструкцій за радіальними напруженнями	32
3.2. Дослідження конструкцій за осьовими напруженнями	35
3.3 Дослідження конструкцій за тангенціальними напруженнями	39
3.4 Дослідження конструкцій за дотичними напруженнями	41
3.5 Дослідження конструкцій за еквівалентними напруженнями	44
3.6 Порівняння результатів досліджень	48
Висновки	49
4. ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ З'ЄДНАННІ МІДІ З ТУГОПЛАВКИМ МАТЕРІАЛОМ З ВРАХУВАННЯМ МИТТЄВОЇ ПЛАСТИЧНОСТІ	51
4.1. Дослідження конструкцій за радіальними напруженнями	52
4.2 Дослідження конструкцій за осьовими напруженнями	55

					МР 8.132.6121м.01.06 ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.3. Дослідження конструкцій за тангенціальними напруженнями	58
4.4 Дослідження конструкцій за дотичними напруженнями	61
4.5 Дослідження конструкцій за еквівалентними напруженнями	64
4.6 Дослідження конструкцій за пластичними деформаціями.....	67
4.7 Порівняння результатів досліджень.....	69
Висновки	70
5. ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ З'ЄДНАННІ МІДІ З ТУГОПЛАВКИМ МАТЕРІАЛОМ З ВРАХУВАННЯМ ДЕФОРМАЦІЇ ПОВЗУЧОСТІ ПРИ ОХОЛОДЖЕНІ З ТИСКОМ ТА ВИТРИМКОЮ	73
5.1. Дослідження конструкції з врахуванням деформації повзучості при миттєвому охолодженні	75
5.2. Дослідження конструкції за радіальними напруженнями.....	77
5.3. Дослідження конструкції за осьовими напруженнями	80
5.4. Дослідження конструкції за тангенціальними напруженнями	82
5.5. Дослідження конструкції за дотичними напруженнями	83
5.6. Порівняння результатів досліджень.....	85
Висновки	85
6 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ КАТОДУ	88
6.1. Матеріали та обладнання для паяння	89
6.2. Режим паяння	90
6.3. Економія матеріалу при застосування технології виготовлення катоду	91
Висновки	94
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	96
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	98

ВСТУП

Основними факторами, які визначають експлуатаційну надійність і термін роботи деталей та конструктивних елементів машин, інших виробів є властивості матеріалів їх робочих поверхонь. Тому створення зносостійких, корозійностійких, жаростійких, хімічностійких, електроізоляційних, теплозахисних та інших видів покриттів дає можливість суттєво скоротити втрати часто дефіцитних матеріалів і дозволяє підвищити якість та надійність машин, обладнання, споруд.

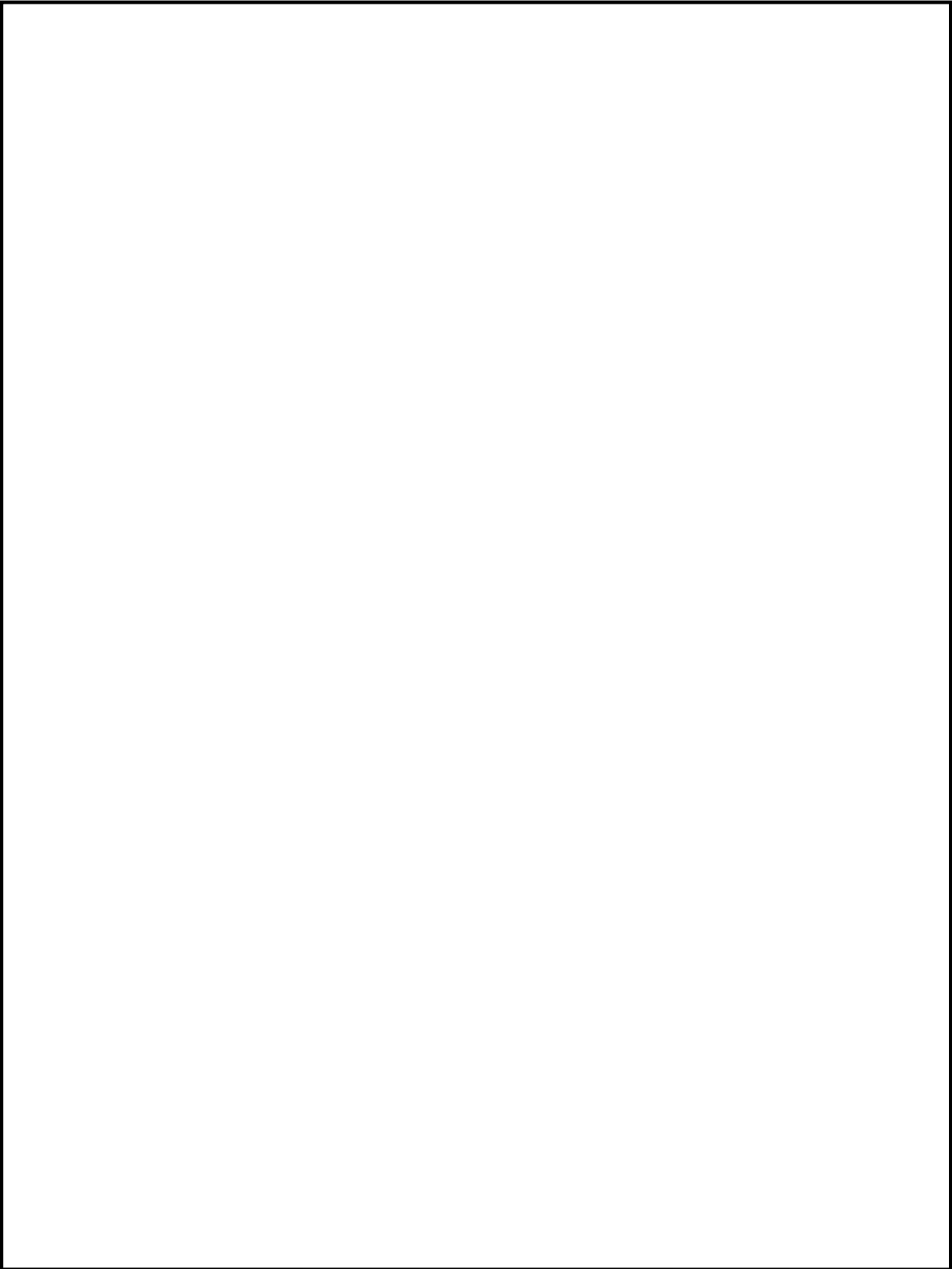
В останні роки значного поширення набули процеси нанесення багатофункціональних покриттів напиленням, серед яких є газотермічні та вакуумно-конденсаційні методи. Найбільш перспективним способом є вакуумно-конденсаційне нанесення покриттів з іонізацією потоку частинок, що напилюються, які стимулюються плазмою. Часто його називають іонно-плазмовим. Висока ефективність та універсальність методу визначається його особливістю: можливістю нанесення покриттів з різних матеріалів на різноманітні конструкції і матеріали.

При створенні покриттів з наперед заданими властивостями важливе значення має вибір первинних матеріалів. Різноманітність призначення покриттів потребує наявності широкого кола первинних матеріалів. При цьому спосіб нанесення покриття визначається здебільшого видом матеріалу. Саме тому вміння раціонально вибрати первинні матеріали, щоб отримати задані властивості покриттів є важливим.

Первинними матеріалами для іонно-плазмового напилення можна вважати катод з тугоплавких металів, наприклад, ніобію, танталу, молібдену, цирконію. Недоцільно виготовляти весь катод з цих матеріалів, тому що вони є коштовними. Раціонально використовувати складені катоди з менш дорогого матеріалу та коштовного, наприклад, Nb-Cu. Але вони суттєво відрізняються один від одного фізико-механічними властивостями і головною проблемою їх з'єднання є власні напруження що призводять до руйнування деталей при охолодженні або в процесі експлуатації.

Метою роботи було вибір конструкції катоду на основі дослідження напружено-деформованого стану в з'єднаннях різнорідних металів та розробка рекомендацій для його виготовлення.

					МП 8.132.6121м.01.06 ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					МР 8.131.6121м.01.06.01. ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Аналіз способів з'єднання різнорідних матеріалів та дослідження напружено-деформованого стану з'єднань			Літ.	Арк.	Аркушів	
Розробив		Барабаш М.С.									
Перевірів		Матвієнко М.В.							5		
Рецензент								ХННІ НУК			
Н. Контр.											
Зав. каф.											

1. Аналіз способів з'єднання різноманітних матеріалів та дослідження напружено-деформованого стану з'єднань

1.1 Спеціальні способи зварювання тиском

При виготовленні сучасних конструкцій, виробів широко використовують різноманітні матеріали, які мають необхідні властивості міцності та фізико-хімічні властивості. Виникає проблема з'єднання матеріалів, що відрізняються за властивостями. Це пов'язано з тим, що часто буває складно знайти матеріал, задовольняючий одночасно всім необхідним вимогам.

Існує безліч пар різноманітних матеріалів, яким характерні істотні відмінності в температурі плавлення, густині, коефіцієнтах теплофізичних властивостей, особливо в коефіцієнтах лінійного розширення.

Відомо багато способів з'єднання різноманітних матеріалів. Сьогодні широко застосовують різноманітні способи зварювання в твердій фазі: високочастотне, дифузійне, тертям, ультразвукове, вибухом, холодне та ін.. Цьому сприяли розробка теоретичних основ зварювання в твердій фазі та швидкий прогрес електронної техніки, точного приладобудування і засобів автоматизації. В ряді випадків успішно застосовують паяння.

Способами зварювання в твердій фазі можна з'єднувати практично любі металічні сплави в однорідному і різноманітному сполученнях, метали з напівпровідниками та кераміками, пластмаси і т. ін.. Чим вище ступінь локалізації пластичної деформації в зоні з'єднання, тим ефективніше способи зварювання в твердій фазі забезпечують точність розмірів виробів, збереження механічних та спеціальних властивостей матеріалів, що зварюють, і тим легше вони дозволяють з'єднувати крихкі матеріали, особливо в різноманітних сполученнях [5].

Останній час характеризується інтенсивним розвитком зварювання тиском. Це обумовлено тим, що зварювання тиском дає унікальні можливості для з'єднання матеріалів із поганою здатністю до зварювання плавленням. До зварювання в твердій

					МР 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фазі, як правило, відносять всі види зварювання, в яких в процесі формування з'єднання не утворюється рідкий метал, а якщо і утворюється, то в тому чи іншому ступені видаляється, шляхом видавлювання його з зони з'єднання. Із спеціальних способів зварювання тиском успішно розвивалися та знайшли широке розповсюдження зварювання тертям, дифузійне, струмами високої частоти, холодне, вибухом та інші [2].

При зварюванні тиском процеси утворення фізичного контакту та активації поверхонь звичайно визначаються пластичною деформацією, а об'ємна взаємодія - температурою. Залежно від інтенсивності силового впливу при одних способах зварювання необхідно обмежувати величину та швидкість пластичної деформації, при інших - необхідна інтенсифікація пластичної деформації [4].

Аналізуючи властивості різних способів зварювання тиском слід відзначити, що стосовно досліджуваних у роботі матеріалів і конструкцій деякі з них не можуть бути використаними, наприклад холодне, ультразвукове, пічне зварювання тощо. Найбільш перспективним є дифузійне зварювання та зварювання тертям.

Зварювання тертям особливо привабливе для деталей циліндричної форми. При інерційному зварюванні з'єднання утворюється при поступовому зменшенні відносного руху поверхонь під дією сил їх тертя, тобто в умовах дії осьових і тангенціальних напружень. Тому час та можливість формування інтерметалідних прошарків різномірними металами обмежені, що є позитивним фактором.

Особливістю зварювання тертям різномірних матеріалів є асиметрія температурного і деформаційного полів, що призводить до зміщення поверхні тертя в заготовку з меншим опором зсуву при температурі зварювання. Це означає, що поверхні схоплюються на початковій стадії зварювання, хоча їх з'єднання може бути недосконалим. При зварюванні різномірних сталей якість цього з'єднання надалі зростає завдяки високотемпературній деформації металу в зоні стику. При зварюванні різномірних металів, які утворюють інтерметаліди, збільшення часу їх контактування в нагрітому стані, навпаки, призводить до незворотних шкідливих змін складу і структури металу.

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зварювання тертям міді та ніобію є проблематичним у зв'язку з великою різницею температур схоплення з'єднуваних поверхонь та опорів пластичній деформації [5]. Ще більшою є різниця властивостей при з'єднанні міді з молібденом або танталом чи цирконієм. Тому цей спосіб зварювання було відхилено.

Дифузійне зварювання застосовують для з'єднання як однорідних, так і різнорідних матеріалів. Температура зварювання в більшості випадків складає 0,6...0,8 температури плавлення (за абсолютною шкалою) металу, що зварюється, або більш легкоплавкого в різнорідних сполученнях.

При з'єднанні різнорідних матеріалів необхідно враховувати тривалість процесу активації більш твердого матеріалу, а також можливість утворення крихких проміжних фаз, що вимагає жорсткого контролю дифузійних процесів. Дифузійну взаємодію матеріалів, які з'єднуються, можна розрахувати, залежно від схеми з'єднання.

При зварюванні різнорідних матеріалів, які значно відрізняються за своїми властивостями, наприклад, коефіцієнтами термічного розширення, застосування високопластичних прокладок із нікелю, міді, алюмінію дозволяє знизити рівень напружень у з'єднанні. За допомогою проміжних прокладок можна отримати зварні з'єднання без утворення крихких інтерметалідних фаз між різнорідними матеріалами, знизити температуру зварювання однорідних матеріалів тощо. Але великою проблемою залишається активація поверхні тугоплавкого металу при зварюванні з міддю. При цьому необхідно підвищувати температуру зварювання, що при охолодженні збільшує рівень власних напружень. Тому найбільш перспективне дифузійне зварювання з проміжною прокладкою, яка розплавляється. Цей спосіб ще називають у літературі паянням з тиском або зварюванням-паянням з тиском. Оскільки зустрічаються всі три назви, то в роботі вони розглядаються адекватними.

1.2 Власні напруження при з'єднанні різнорідних матеріалів

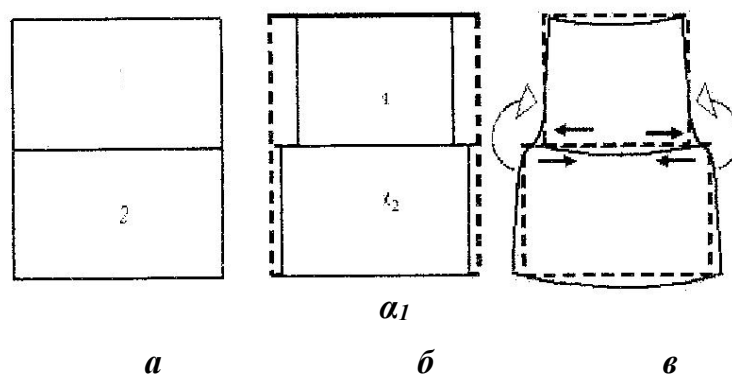
Основними причинами утворення напружень і деформацій при зварюванні та паянні є нерівномірний розподіл температури при нагріванні та охолодженні, а та-

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кож неоднорідність матеріалу конструкції. Перша причина є визначальною при зварюванні з місцевим (локальним) нагріванням конструкцій з однорідного матеріалу, друга – при дифузійному зварюванні і паянні різнорідних матеріалів. При зварюванні різнорідних металів та при паянні з нерівномірним нагріванням обидві причини накладаються. До зазначених причин також можуть додаватись структурні деформації та напруження.

Механізм утворення деформацій і напружень в умовах зварювання і паяння відрізняється. При зварюванні з місцевим нагріванням утворення і зростання деформацій та напружень починається вже на стадії нагрівання, тоді як при паянні і дифузійному зварюванні (з'єднання з загальним рівномірним нагріванням), як правило, цей процес починається лише після утворення монолітного з'єднання - утворення міжатомних зв'язків і кристалізації припою, тобто на стадії охолодження.

Механізм утворення власних напружень і деформацій у спаяному з'єднанні розглянемо на прикладі двошарового бруса (рис. 1.1). При зміні температури незв'язних між собою різнорідних шарів бруса кожний з них змінює свою довжину по-різному, як показано на рисунку 1.1, б. Кожний шар має свою температурну деформацію, пропорційну зміні температури і коефіцієнту лінійного термічного розширення (КЛТР) [8].



а – до охолодження; *б* – після охолодження у вільному стані; *в* – після охолодження спаяного з'єднання

Рисунок 1.1. Схема утворення власних напружень і деформацій при паянні різнорідних матеріалів: α_1 , α_2 – коефіцієнти лінійного температурного розширення з'єднуваних матеріалів (верхнього 1 і нижнього 2 шару бруса)

Після з'єднання елементів 1 і 2 їх автономне зміщення по границі неможливе, тому утворюються власні силові деформації і напруження в металі і деформації всієї конструкції (вузла) як єдиного цілого (рис. 1.1, в).

Методи розрахунку, засновані на гіпотезі плоских перерізів, дозволяють оцінити напружено-деформований стан найпростіших з'єднань типу багатошарових пластин, складених стержнів і кілець. Вони прості і зручні для розрахунку, але не відповідають на багато питань, що виникають під час паяння навіть найпростіших зразків, не говорячи вже про більш складні вузли. Більш повну і точну картину напружено-деформованого стану дозволяють дати методи теорії пружності і пластичності, зокрема метод скінчених елементів [8].

1.3 Методи розрахунку напружено-деформованого стану різнорідних матеріалів в умовах пружності та миттєвої пластичності

До широко відомих універсальних методів математичного моделювання та аналізу напружено-деформованого стану відносяться варіаційні та проєкційні методи, які прийнято називати прямими. Основи варіаційного методу розроблені в роботах І. Я. Тарановського, О. А. Ганаго, А. А. Поздєєва, В. А. Колмогорова, Л. Г. Степанського, А. Г. Овчиннікова та ін.. Характерною особливістю варіаційного методу є те, що крайові задачі зводяться до розв'язку систем алгебраїчних рівнянь. При цьому наближені розв'язки задач шукаються в вигляді лінійних комбінацій так званих координатних функцій, які задовольняють крайові умови задачі, а також вимоги повноти і апроксимаційної універсальності. Побудова координатних функцій, які задовольняли б перераховані умови для областей довільної форми залишається проблематичною.

В наш час у варіаційному методі при розв'язанні задач теорії пластичності у більшості випадків використовують теореми про екстремальні властивості дійсних полів швидкостей деформацій і напружень. При цьому поряд з дійсними розглядаються статично допустимі поля напружень і кінематично допустимі поля швидкостей: перші з них задовольняють умови рівноваги, пластичності і граничні

					МР 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

умови для напружень; другі - умови нестисливості, сумісності та граничні умови для швидкості. На основі відомих теорем складаються варіаційні функціонали і задача зводиться до пошуку полів, при яких шукані характеристики мають екстремальні значення. Розроблено ряд варіаційних принципів: віртуальних швидкостей і напружень, віртуальних швидкостей, віртуальних напружень, мінімуму повної потужності тощо, які дозволяють ефективно розв'язувати різні класи задач. Особливо поширені методи верхньої і нижньої оцінки зусиль деформування, які мають велике практичне значення [9]. При використанні прямого варіаційного методу наближений розв'язок крайової задачі приймають у вигляді лінійної комбінації координатних функцій з коефіцієнтами варіації [10]. Від вдалого обрання координатних функцій залежить точність розв'язку і складність алгоритму.

Метод скінчених елементів (МСЕ) з математичної точки зору - це узагальнення варіаційного методу, його особливістю є те, що координатні функції вибираються у вигляді кусочно-лінійних функцій. Завдяки універсальності, придатності до алгоритмізації і ефективності, а також в зв'язку з розвитком обчислювальної техніки метод скінчених елементів є, в даний час, одним із основних методів визначення напружено-деформованого стану під час пружних та пластичних деформацій [12].

При використанні МСЕ вирішення крайової задачі для заданої області шукається у виді набору функцій, визначених на деяких підобластях (скінчених елементах). Як слідує з основної концепції МСЕ, вся модель конструкції ділиться на безліч скінчених елементів, з'єднаних між собою у вершинах. Сили діють у вузлах. Скінчений елемент не є «абсолютно жорстким» тілом [13]. Є декілька найбільше уживаних типів скінчених елементів: брус, стрижень, тонка пластина або оболонка, двовимірне чи тривимірне тіло. Природно, що при побудові моделі можуть бути використані не один, а декілька типів елементів.

Достовірність розрахунків по МСЕ залежить від багатьох чинників, у тому числі і від кількості скінчених елементів. Однак, якщо напруження не змінюються значно в межах моделі, то кількість скінчених елементів несуттєво впливає на точність обчислення напружень.

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Скінчені елементи можуть бути лінійними або параболічними. Лінійні елементи мають прямі сторони і вузли тільки в кутах. Параболічні елементи можуть мати проміжний вузол уздовж кожної зі сторін. При рівній кількості елементів параболічні елементи дають більшу точність обчислень.

МСЕ - наближений метод, точність якого залежить від правильного вибору типів і розмірів скінчених елементів. Так, наприклад, більш частіша сітка потрібна там, де очікується великий градієнт деформацій або напружень. Більш рідка сітка може застосовуватися в зонах з більш або менш постійними деформаціями чи напруженнями, а також в областях, що не представляють особливого інтересу. У зв'язку з цим дослідник повинен вміти передбачати області концентрації напружень.

Точність результатів аналізу зменшується, якщо розміри сусідніх елементів поблизу концентратора напружень істотно відрізняються.

Форма скінчених елементів також впливає на точність обчислень. З цієї точки зору слід уникати занадто вузьких і витягнутих елементів, тому що елементи з приблизно однаковими сторонами дають меншу помилку.

Одночасно в сітці можуть бути присутні трикутні і чотирикутні елементи, однак між ними не повинно бути розривів.

Задавання граничних умов - один з відповідальних етапів скінчено-елементного аналізу. Граничні умови (переміщення або сили) прикладаються тільки до вузлів. Максимальне число граничних умов, прикладених до вузла, дорівнює числу його ступенів свободи.

Схема розміщення граничних умов залежить від виду навантаження (розтяг, чистий вигин, зсув). Якщо конструкція має осі або площини симетрії, то при призначенні граничних умов необхідно це враховувати.

1.4. Вибір програмного комплексу для моделювання напружено-деформованого стану

Аналітичні методи оцінки відгуку конструкцій на зовнішні впливи різної фізичної природи без натурного моделювання виникли достатньо давно. Поява і

					МР 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розвиток обчислювальної техніки дало новий поштовх удосконалюванню чисельних методів аналізу, які є сьогодні основним інструментом розраховувача. Засоби автоматизації інженерного аналізу, засновані на чисельних методах, стали невід'ємною частиною процесу проектування виробу. Для успішного застосування кожен розрахунковий пакет повинен відповідати двом вимогам:

- втілювати найефективніші чисельні алгоритми;
- надавати користувачеві розвинутий набір сервісних функцій по підготовці вихідних даних і обробці результатів розрахунку.

В залежності від ступеня відповідності даним критеріям всі програмні засоби автоматизації підрозділяються на легкі, середні та важкі. Ступінь «важкості» в даному випадку є показником потужності і ефективності. Розглянемо найбільш потужні розрахункові комплекси, що використовують метод скінчених елементів і що дозволяють промодельовати напружено-деформований стан.

LS-DYNA - багатоцільова програма, що використовує явне формулювання методу скінчених елементів (MCE), призначена для аналізу нелінійного динамічного відгуку тривимірних пружних структур.

ADAMS. На сьогоднішній день ADAMS знаходить застосування в автомобілебудуванні, авіабудуванні, космонавтиці, залізничному транспорті, загальному машинобудуванні, суднобудуванні, робототехніці, приладобудуванні, біомеханіці і навіть в індустрії відпочинку і розваг.

ProCAST. Найбільш потужна і коректна програма для розрахунку ливарних процесів. ProCAST дозволяє інженеру-проектувальникові розраховувати та візуалізувати в тривимірній постановці процес плину та отвердіння металу в формі, передбачати мікроструктуру, виникнення раковин, пористості, оптимізувати положення літників, мінімізувати залишкові напруження, контролювати тепловий баланс системи «виливок-форма» та інше.

Pro/Engineer. Pro/MESH, Pro/FEM-POST і Pro/SURFACE - модулі Pro/Engineer для розрахунку на міцність методом скінчених елементів.

Pro/MESH забезпечує конструктору можливість створення сітки скінчених елементів для моделей, отриманих в Pro/Engineer. Pro/FEM-POST забезпечує повний

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

набір можливостей постпроцесора для аналізу результатів, отриманих методом скінчених елементів, і надає користувачам можливість відображати результати аналізу в середовищі Pro/Engineer. Pro/SURFACE розширює можливості Pro/Engineer, надаючи інструменти для ефективної розробки та вдосконалення найбільш складних геометричних поверхонь і поверхонь вільної форми.

ANSYS. Успіх досягнуто на підставі наступних найважливіших відмітних особливостей:

- 1) ANSYS – єдина скінчено-елементна система з таким повним охопленням явищ різної фізичної природи: міцність, теплофізика, гідрогазодинаміка і електромагнетизм з можливістю рішення зв'язаних задач, об'єднуючих всі перераховані види;
- 2) найширша інтеграція і двосторонній обмін даними з усіма CAD/CAE/CAM – системами;
- 3) відкритість (тобто модифікуємість та доповнюваність);
- 4) самий високий показник «ефективність/вартість»;
- 5) перший та єдиний скінчено-елементний програмний комплекс, розроблений та сертифікований згідно міжнародним стандартам ISO 9000 і ISO 9001;
- 6) ANSYS надає унікальну за повнотою і саму обширну за змістом сучасну систему help на основі гіпертекстового представлення, доступ до якої здійснюється в інтерактивному режимі online [14].

Аналізуючи перераховані вище описи програм і вид майбутніх задач, для розрахунків напружено-деформованого стану обирали програмний комплекс ANSYS, який забезпечує максимально доступну вірогідність і точність розрахунків.

Висновки, постановка мети і завдання досліджень

1. Вирішити задачу з'єднання різнорідних металів можна застосовуючи один із видів зварювання у твердому стані, наприклад дифузійне зварювання, або паяння.

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Складність забезпечення оптимального поєднання міцності і пластичності в більшості випадків визначається технологічними особливостями твердофазного зварювання, де присутні обмеження за величиною температур і деформацій при зварюванні. Велике значення мають технологічні параметри, що впливають на механізми і кінетику фізико-хімічних процесів, відповідальних за формування з'єднань. Доводиться враховувати можливість утворення в зоні з'єднань складних структурних комплексів і метастабільних фаз, вплив яких на властивості з'єднань з різнорідних матеріалів вивчено недостатньо.

3. При з'єднанні вузлів з матеріалів і сплавів різних за фізико-хімічними і фізико-механічними властивостями головною проблемою вважається забезпечення працездатності їх з'єднань. Багато наукових і прикладних задач з'єднання різнорідних матеріалів дотепер залишаються маловивченими і вимагають вирішення.

4. Якість і працездатність вузлів з різнорідних матеріалів в значній мірі визначаються впливом фізико-механічних властивостей матеріалів, геометричних характеристик конструкції на утворення і розподіл власних напружень і деформацій.

5. У літературі відсутні експериментально підтверджені рекомендації, які дозволяли б на стадії проектування визначити величину і характер розподілу напружень та деформацій у складних вузлах. Немає чітких рекомендацій з раціонального конструктивного оформлення вузлів з різнорідних матеріалів.

6. Для з'єднання різнорідних матеріалів, а саме міді з ніобієм та групою тугоплавких матеріалів (тантал, молібден, цирконій), що є схожими за фізико-хімічними властивостями, а саме за КЛТР з ніобієм, найбільш перспективним є паяння з тиском (дифузійне зварювання з прокладкою, що розплавляється).

7. Для вирішення проблеми з'єднання міді з тугоплавкими металами найбільш доцільно використовувати розплав, що утворюється при контактнореактивному плавленні в системі мідь-титан і дослідити вплив фізико-механічних властивостей матеріалів, геометричних характеристик конструкції вузлів на утворення і розподіл власних напружень і деформацій, що дозволить вибрати оптимальну конструкцію катоду.

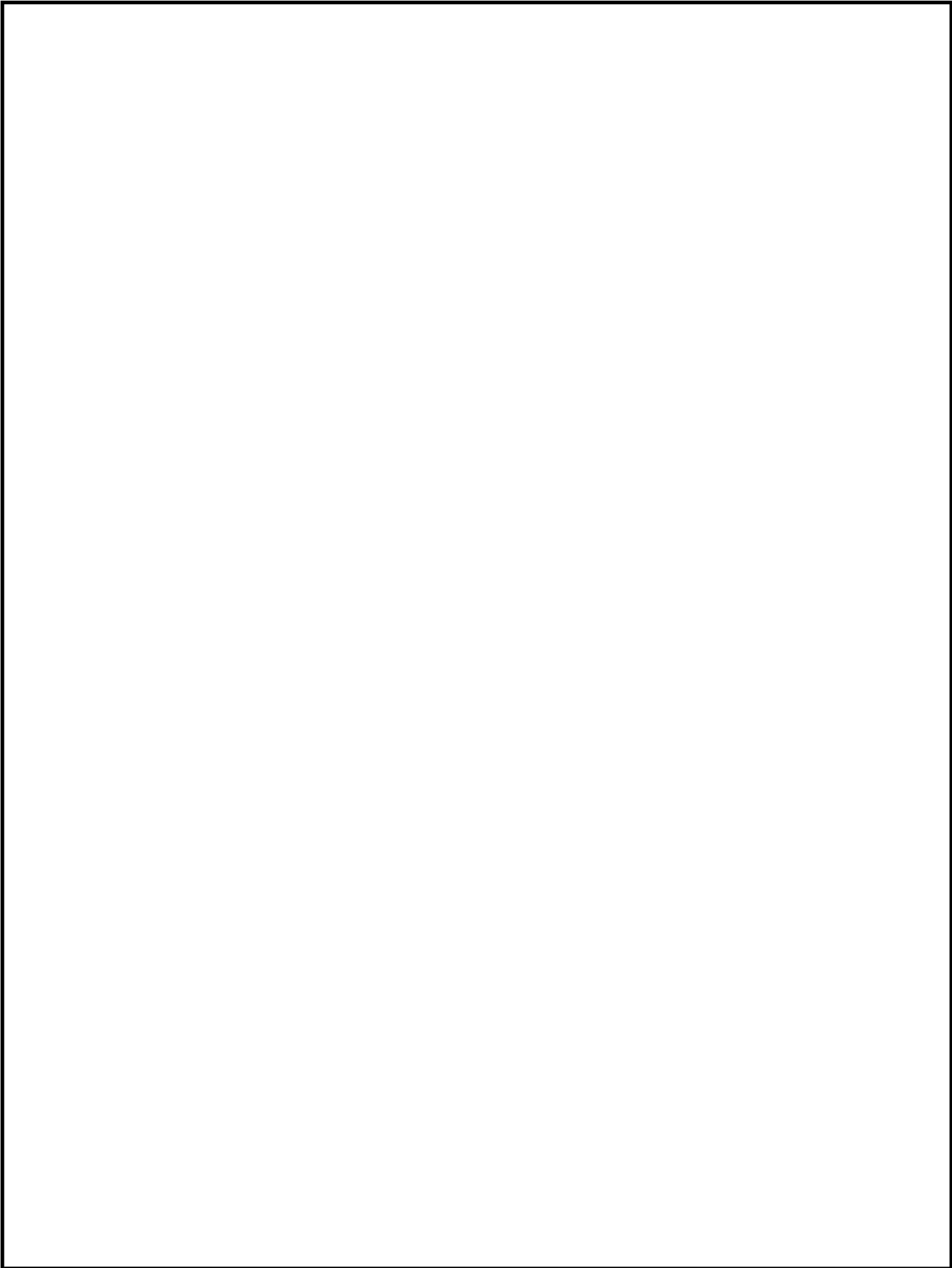
					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метою роботи був вибір конструкції катоду на основі дослідження напружено-деформованого стану в з'єднаннях різнорідних металів та розробка рекомендацій для його виготовлення.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідження матеріалів, що з'єднуються;
- побудова моделей складеного катоду різного конструктивного оформлення;
- вибір програми розрахунку на базі метода скінчених елементів для моделювання напружено-деформованого стану;
- виконання розрахунків в умовах пружного стану, миттєвої пластичності та повзучості;
- аналіз отриманих результатів;
- розробка рекомендацій по оптимальному конструктивному оформленню та виготовленню вузла катоду.

					МР 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					MP 8.131.6121м.01.06.02. ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Барабаш М.С.			Методика проведення досліджень	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірів		Матвієнко М.В.					17	
Рецензент						ХННІ НУК 17		
Н. Контр.								
Зав. каф.								

2. Методика проведення досліджень

2.1. Досліджені матеріали

Чиста мідь має ряд цінних технічних властивостей. Висока пластичність, висока електро- та теплопровідність, мала окиснюваність – все це обумовило широке застосування міді [16].

Таблиця 2.1. Основні фізичні властивості міді

Властивість	Cu
Атомний номер	29
Атомна маса	63,5
Густина при 20°C, г/см ³	8,9
Температура плавлення, °C	1083
кипіння, °C	2595
Коефіцієнт лінійного розширення $\alpha \cdot 10^6$	16,5
Питомий електроопір, Ом·см·10 ⁻⁶	1,7

Таблиця 2.2. Механічні властивості чистої міді

Стан	σ_B , МПа	δ , %
Лита	147-196	15-25
Прокатана та відпалена	245-265	40-50
Нагартована	392-422	1-2

Ніобій – тугоплавкий метал, температура плавлення якого 2415оС (вище температури плавлення заліза 1539оС). Основні фізичні властивості ніобію приведені в таблиці 2.3 [17].

Таблиця 2.3. Фізичні властивості ніобію

Властивість	Nb
Густина при 20°C, г/см ³	8,56
Температура рекристалізації, °C	1100
плавлення, °C	2415
кипіння, °C	3300
Теплопровідність, Дж/(см·град·с)	0,523
Питомий електроопір при 20°C, Ом·см·10 ⁻⁶	17,1
Коефіцієнт лінійного розширення $\alpha \cdot 10^6$	7,1

Вдале сполучення властивостей – задовільна міцність, достатньо високі показники жароміцності, пластичності, висока корозійна стійкість в різних хімічних середовищах, висока температура плавлення, середня густина і низький інтервал переходу з пластичного стану в крихкий – робить ніобій одним з перспективних тугоплавких металів.

Однак недоліком ніобію є висока окиснюваність на повітрі і взаємодія з воднем при порівняно низьких температурах (200-250°C і вище).

Як теплоємність, так і теплопровідність ніобію зі зростанням температури зростають, а температуропровідність зменшується.

Механічні властивості ніобію в значній мірі залежать від ступеня чистоти металу, складу і вмісту домішок, методу виготовлення і режимів попереднього оброблення. В таблиці 2.4. приведені механічні властивості ніобію в залежності від стану матеріалу. Теплофізичні властивості матеріалів вказані в таблиці 2.5 [17, 18].

Таблиця 2.4. Механічні властивості ніобію при нормальній температурі

Стан ніобію	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	НВ
	МПа		%		МПа
Відливков	540-590	540	10-13	20-30	1765-1965
Пресований	685-785	590	20-25	25-35	1965-2455

Таблиця 2.5. Теплофізичні властивості матеріалів, що з'єднуються

Матеріал	Температура, $T, ^\circ\text{C}$	Модуль пружності E , ГПа	Коефіцієнт Пуассона	КЛТР $\cdot 10^6$, 1/град		Границя пластичності, МПа		Модуль зм'якшення, ГПа
					$T, ^\circ\text{C}$	$T, ^\circ\text{C}$		
Ніобій [17]	20	104	0,39	-	20-200	200	368	
	200	101		-	20-300	300	308	
	300	99		7,39	20-400	400	338	
	400	100		7,56	20-600	500	339	
	700	97		7,72	20-800	600	321	
				7,88	20-1000	800	309	
Мідь [18]	20	125	0,34	16,7		69		1,5
	200	110		17,2		60		1,3
	400	100		17,8		45		0,9
	700	60		19,4		30		0,8
	800	40		20,5		20		0,7

Тантал, молібден та цирконій – є тугоплавкими металами. Їх фізичні властивості вказані в таблиці 2.6. Вони є схожими за властивостями, а саме за КЛТР з ніобієм. Теплофізичні властивості цих тугоплавких матеріалів вказано в таблиці 2.7.

Таблиця 2.6. Фізичні властивості тугоплавких металів [17]

метал	Температура, °С			Густина, г/см ³	Теплопровідність, Дж/(см·град·с °С)
	рекристалізації	плавлення	кипіння		
Тантал	1000	1996	6100	16,6	0,544
Молібден	1000	2625	4800	10,2	1,46
Цирконій	-	1855	3577	6,0	0,16

Таблиця 2.7. Теплофізичні властивості тугоплавких металів [17]

Матеріал	Температура, T, °С	Модуль пружності E, ГПа	Коефіцієнт Пуассона	КЛТР·10 ⁶ , 1/град		Границя плинності, МПа	
					T, °С	T, °С	
Тантал	20	190	0,35	7,0	20-400	27	463
				7,05	20-600	98	409
				7,07	20-800	205	386
				7,2	20-1000	316	510
				7,35	20-1200	427	450
				7,5	20-1400	538	413
				7,6	20-1600	649	308
				7,82	20-1800	760	209
				8,0	20-2000	871	153
				8,25	20-2200	982	149
Молібден	20	328	0,3	5,3	20-200		
	100	323		5,7	20-400	871	363
	200	319		6,15	20-600	982	314
	400	309		6,5	20-800	1093	275
	600	299		6,9	20-1000	1371	103
	800	289		7,3	20-1200	1510	76
	1000	279		7,75	20-1400	1649	49
	1200	267		8,2	20-1600		
	20	98	0,32	5,48	20-100	20	471
	200	86		6,36	20-200	100	392
Цирконій	400	74		7,12	20-400	200	265
	600	63		7,88	20-600	300	196
	800	52		8,64	20-800	400	157
	1000	41		9,4	20-1000	500	98
	1200	33					
	20	98		5,48	20-100	20	471
	200	86		6,36	20-200	100	392
	400	74		7,12	20-400	200	265

Тантал відноситься до групи пластичних тугоплавких матеріалів. Зустрічається він в рудах разом з ніобієм. Має здатність абсорбувати гази, поглинати азот,

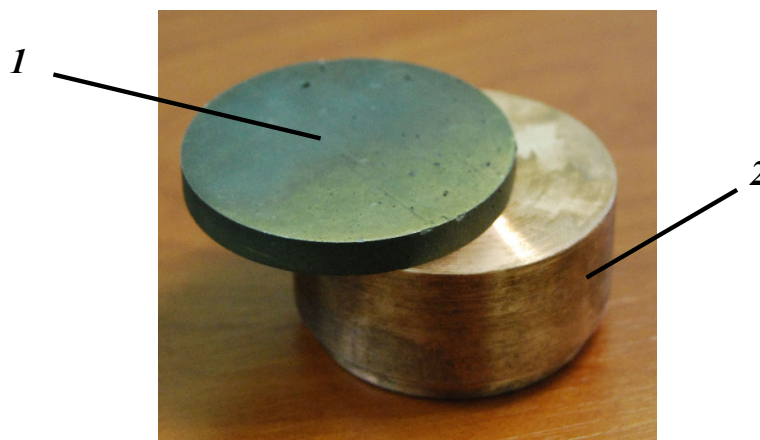
водень, кисень, вуглекислий газ, утворюючи відповідні з'єднання нітриди, гідриди, окисли і карбіди.

Молібден відноситься до групи крихких тугоплавких матеріалів. Він та його сплави відрізняються високим модулем пружності, малим температурним коефіцієнтом розширення, хорошою термостійкістю, малим перерізом захоплення теплових нейтронів. Електропровідність молібдену нижче, ніж у міді, але вище, ніж у заліза.

Цирконій має високу здатність до пластичної деформації, задовільними механічними властивостями, високою температурою плавлення. Він активно поглинає гази – водень, кисень, азот, утворюючи при цьому гідрид, окисел або нітрид титану.

2.2. Варіанти конструкції катода для іонно-плазмового напilenня

Вузол складеного катода для іонно-плазмового напilenня тугоплавких металів є циліндричною конструкцією (рис. 2.1), яка складається з основного мідного корпусу (2), який служить для кріплення, охолодження і підводу струму, та видаткової частиною (1) з тугоплавкого металу або його лігатури, звичайно з низькою пластичністю, діаметром 40...60 мм та товщиною 5...20 мм.



1 - видаткова частина з тугоплавкого металу; 2 - основний мідний корпус

Рисунок 2.1. Загальний вид вузла складеного катода

Чисті тугоплавкі метали – пластичні, але не всі. Замість запропонованого ніобію, який є видатковою частиною катода, можна використовувати групу крихких

					MP 8.132.6121м.01.06.02. ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тугоплавких металів, які мають схожі з ним властивості, а саме КЛТР, – це тантал, молібден, цирконій. Для крихких матеріалів небезпечними є розтягуючі напруження.

Одна з основних проблем виготовлення такого вузла – збереження цілісності після остигання в результаті виникнення значних власних напружень. З метою оптимізації і отримання працездатного з'єднання досліджено напружений стан шести варіантів конструкції (рис. 2.2):

- 1 варіант - однаковий діаметр основного корпусу і видаткової частини;
- 2 варіант - більший діаметр основного корпусу порівняно з видатковою частиною та виступ основного корпусу, діаметром рівним видатковій частині і висотою 0,005 м;
- 3 варіант - більший діаметр основного корпусу порівняно з видатковою частиною;
- 4 варіант - прямокутний центруючий виступ на країці основної частини висотою 0,003 м;
- 5 варіант - трикутний виступ на країці основної частини з катетом 0,003м;
- 6 варіант – прямокутне центруюче втоплення в основний корпус на товщину шайби.

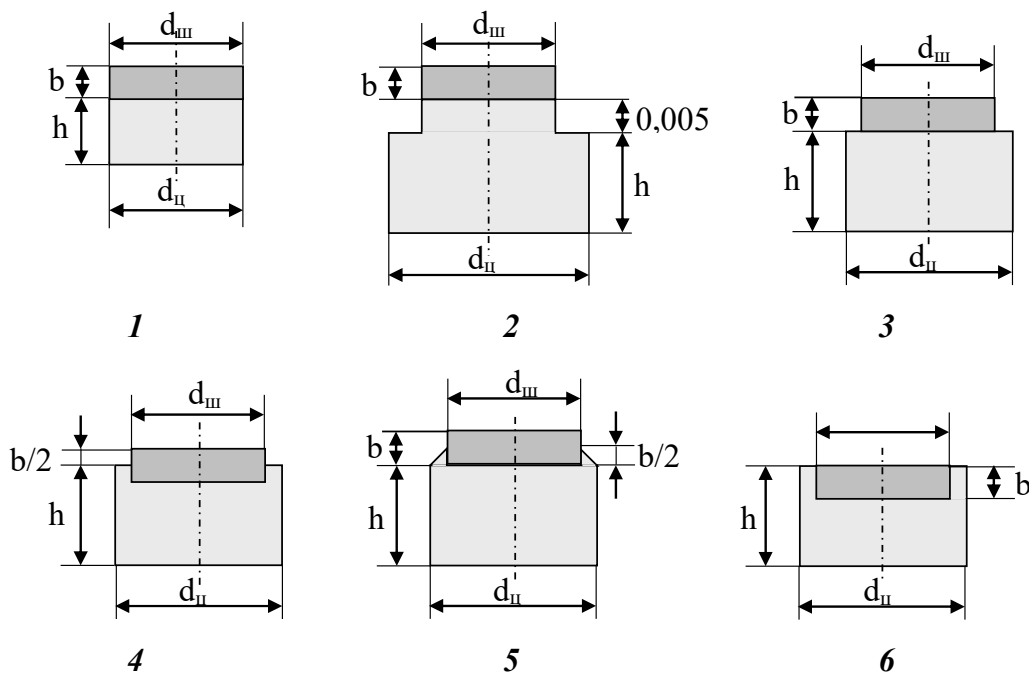


Рисунок 2.2. Варіанти конструкції досліджуваних вузлів складених катодів: *1, 2, 3, 4, 5, 6* – номер варіанту

Геометричні розміри моделей конструкцій вказані в таблиці 2.8.

					MP 8.132.6121м.01.06.02. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Таблиця 2.8. Геометричні розміри моделей конструкцій

Величини \ Варіанти	1	2	3	4	5	6
1. Діаметр шайби ніобію, $d_{ш}$, м	0,05					
2. Товщина шайби з ніобію, b , м	0,006					
3. Діаметр циліндру основного корпусу, $d_{ц}$, м	0,05	0,08	0,06			
4. Висота циліндру основного корпусу, h , м	0,02	0,02	0,04			

Критерії оптимізації варіанту конструкції катоду:

основні: напруження розтягу в тугоплавкому матеріалі;

додаткові: еквівалентні напруження в пластичному матеріалі; зручність і точність складання конструкції.

2.3. Вибір методу з'єднання та припою

Паянням називають технологічний процес з'єднування матеріалів у твердому стані за допомогою припоїв, які розплавляються, змочують з'єднувані поверхні, затікають в зазори між ними та після кристалізації утворюють спаяне з'єднання [8].

Термдеформаційні процеси є одним з найважливіших факторів, які визначають якість з'єднаних конструкцій та їх працездатність.

Отримання з'єднань при паянні можливе тільки після утворення фізичного контакту поверхонь, що з'єднуються, в результаті пластичної деформації. При цьому важливо забезпечити пластичну деформацію металу саме в зоні стику, а не по всій зоні нагрівання деталі, а це визначається характером і розподілом напружень [19].

Інколи для паяння ніобію застосовують легкоплавкі припої, наприклад припій на основі міді, який містить: 30% Ni; 1-2% Fe; 1-2% Si; 0,2% B, який після тривалої витримки при температурі паяння (1150°C) забезпечує отримання достатньо міцних паяних з'єднань [20].

Оскільки температура плавлення міді складає 1080°C, то існуючі припої не підходять за температурами витримки. Обрано метод контактено-реактивного паяння з прошарком, в якому не потрібен припій.

					MP 8.132.6121м.01.06.02. ПЗ		Арк.
							23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Аналізуючи діаграму стану Cu-Nb, яка показана на рис. 2.3, зроблено висновок, що паяне з'єднання не буде якісним, оскільки не буде утворюватися евтектика [21]. Отже необхідно підібрати матеріал (прошарок), який би утворював евтектику з обома металами.

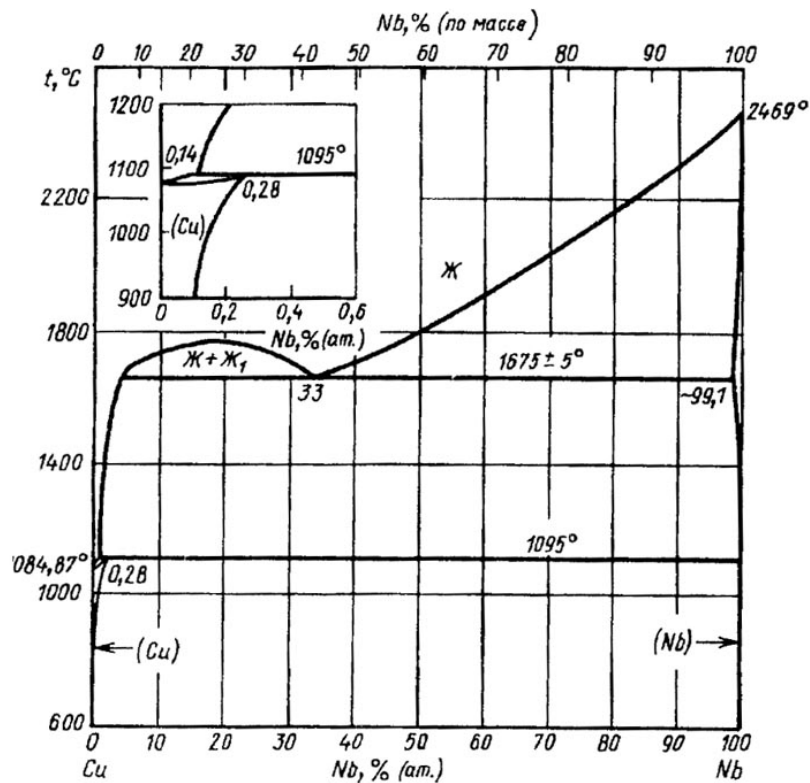


Рисунок 2.3. Діаграма стану Cu-Nb

З метою отримання високоміцних та пластичних п'яних з'єднань для паяння ніобію доцільно застосовувати чисті метали: титан, ванадій, цирконій, які утворюють з ніобієм необмежені тверді розчини. На основі цих металів можна отримати пластичні припої і жароміцні паяні з'єднання, однак всі вони занадто тугоплавкі і тому необхідне устаткування, яке дозволяло б виконувати паяння у високому вакуумі при температурах 1600-1900°C.

Розглянемо діаграми стану Cu-Ti та Cu-Zr (рис. 2.4, 2.5) [21].

З діаграм видно, що мідь як з титаном, так і з цирконієм буде утворювати евтектику: Cu-Ti при температурі – 880°C, а Cu-Zr – 890°C. Отже підходять обидва матеріали. Але так як титан є більш дешевим матеріалом, то рекомендовано застосовувати саме його.

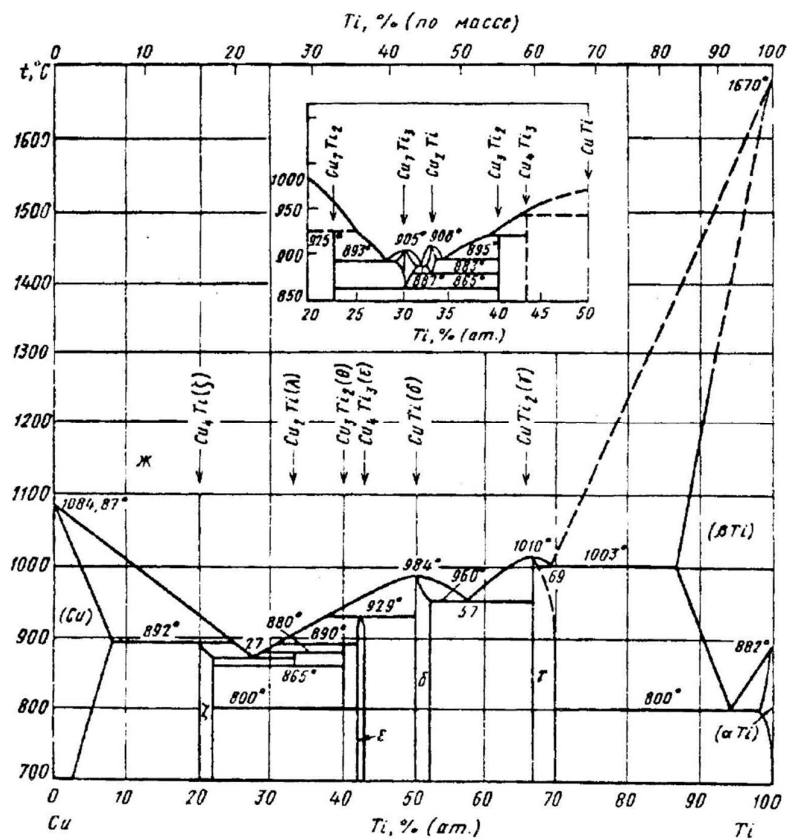


Рис. 2.4. Діаграма стану Cu-Ti

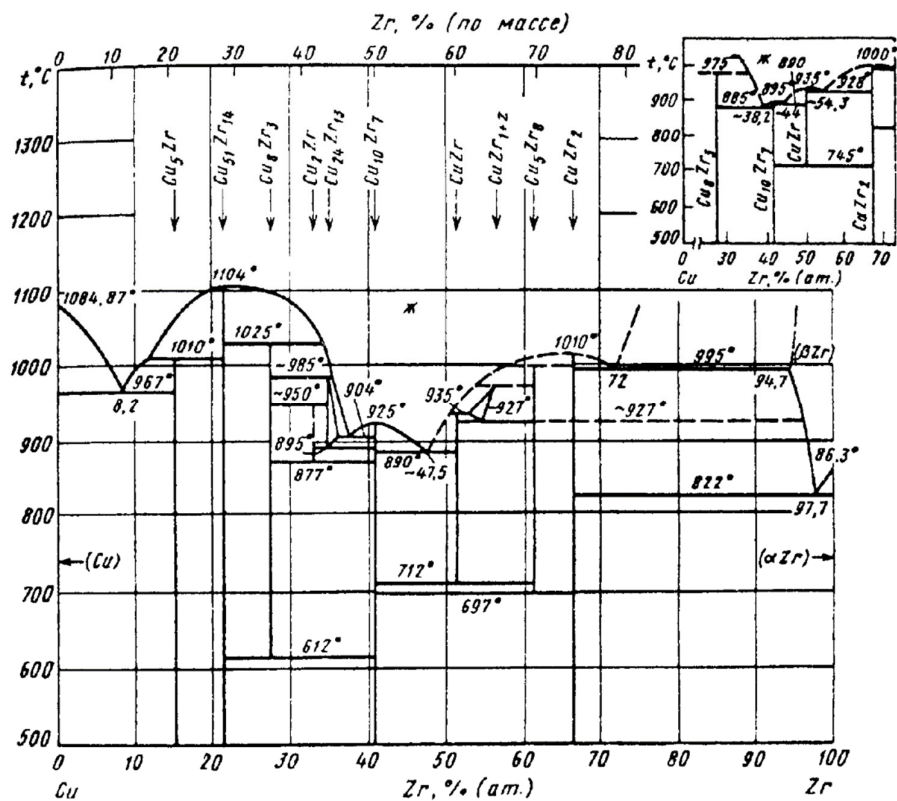


Рис. 2.5. Діаграма стану Cu-Zr

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP 8.132.6121м.01.06.02. ПЗ

Арк.

25

При паянні ніобію з міддю для зниження крихкості запропоновані шаруваті композиційні прошарки, що дозволяють регулювати кількість рідини за рахунок обмеження вмісту активного металу (фольга з титану, розміщеного в шві). Міцність шву, що має структуру твердого розчину системи Cu-Ti-Nb, близька до міцності матеріалів, що паяються.

2.4. Сутність методу кінчених елементів

Одним з найбільш розповсюджених методів моделювання напруженого стану є метод скінчених елементів (МСЕ), який обрано для чисельного моделювання напружено-деформованого стану при з'єднанні матеріалів з різними фізико-механічними властивостями [22].

В основі кожного розрахунку на міцність лежить розрахункова схема, яка включає в себе геометрію конструкції і діючі на неї навантаження (механічні та температурні). В подальшому, в залежності від кінцевих цілей розрахунку, використовуючи ті чи інші моделі матеріалу конструкції, визначаються напруження та деформації елементів конструкції. Потім на основі аналізу полів напружень устанавлюється найбільш небезпечний перетин, при цьому використовуються ті чи інші гіпотези міцності, в залежності від властивостей матеріалу та умов роботи конструкції.

При створенні розрахункової схеми складної конструкції удаються до деякої ідеалізації її форми, при цьому ступінь цієї ідеалізації впливає на вірогідність результатів розрахунку.

В практичних розрахунках урахувати всі наявні особливості конструкції, матеріалу і навантаження неможливо. Приступаючи до практичних розрахунків, ми змушені замінювати реальні тіла деякими ідеалізованими об'єктами – «механічними моделями». Реальне тверде тіло замінюється уявним (модельним) суцільним середовищем.

При розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) елементів конструкції удалині від площадки контакту введення ідеалізованої зосередженої сили цілком виправдане. Але при розрахунку НДС поблизу цієї площадки заміна розподіленого тиску зосередженою силою приводить до значних погрішностей.

					MP 8.132.6121м.01.06.02. ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фізична модель може бути наділена лише частиною властивостей реальної конструкції, а тому її математичний опис є більш простим. Наступним етапом розрахунку є математичний опис поведінки моделі, чи побудова математичної моделі.

Основна ідея методу скічених елементів полягає в тому, що будь-яку безперервну величину можна апроксимувати моделлю, яка складається з окремих елементів. На кожному із цих елементів досліджувана безперервна величина апроксимується кусочно-безперервною функцією, яка будується на значеннях досліджуваної безперервної величини в кінцевім числі крапок розглянутого елемента.

В загальному випадку безперервна величина заздалегідь невідома, і потрібно визначити значення цієї величини в деяких внутрішніх точках області. Дискретну модель можна легко побудувати, якщо спочатку припустити, що відомі числові значення цієї величини в деяких внутрішніх точках області (вузлах). Після цього можна перейти до загального випадку.

Найчастіше при побудові дискретної моделі безперервної величини поступають таким чином:

1) область визначення безперервної величини розбивається на кінцеве число підобластей, які називають елементами. Ці елементи мають загальні вузлові точки і в сукупності апроксимують форму області;

2) в розглянутій області фіксується кінцеве число точок. Ці точки називаються вузловими точками або просто вузлами;

3) значення безперервної величини в кожній вузловій точці спочатку вважається відомим, однак необхідно пам'ятати, що ці значення в дійсності ще мають бути визначені шляхом накладення на них додаткових обмежень в залежності від фізичної сутності задачі;

4) використовуючи значення досліджуваної безперервної величини в вузлових точках і ту або іншу апроксимуючу функцію, визначають значення досліджуваної величини усередині області.

В МСЕ всі види навантаження приводяться до зосереджених сил, діючих у вузлах [14].

До конструкції складеного катоду для іонно-плазмового наплення прикладено навантаження 680°C , тобто охолодження з 700°C до 20°C .

					MP 8.132.6121м.01.06.02. ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5 Програмний комплекс ANSYS

Вирішення завдань за допомогою програми ANSYS складається з трьох етапів: препроцесорна (попередня) підготовка (Preprocessing), здобуття рішення (Solving the Equations) і постпроцесорна обробка результатів (Postprocessing) [23].

На стадії препроцесорної підготовки виконується вибір типа розрахунку, побудова моделі і прикладання навантажень (включаючи і граничні умови). Тут задаються необхідні для вирішення вихідні дані. Вибираються координатні системи і типи скінчених елементів, вказуються пружні постійні і фізико-механічні властивості матеріалу, будується твердотіла модель і сітка скінчених елементів, виконуються необхідні дії з вузлами і елементами сітки, задаються рівняння зв'язку і обмеження.

Після того, як при препроцесорній підготовці побудована розрахункова модель, можна переходити до стадії рішення задачі. Цей етап включає завдання вигляду аналізу і його опцій, навантажень, кроку рішення і закінчується запуском на розрахунок скінчено-елементного завдання.

У програмі ANSYS стадія постпроцесорної обробки слідує за стадіями препроцесорної підготовки і здобуття рішення. За допомогою постпроцесорних засобів програми є можливість звернутися до результатів рішення і інтерпретувати їх потрібним чином.

Результати рішення включають значення переміщень, температур, напруження. Підсумком роботи програми на постпроцесорній стадії є графічне і (або) табличне представлення результатів.

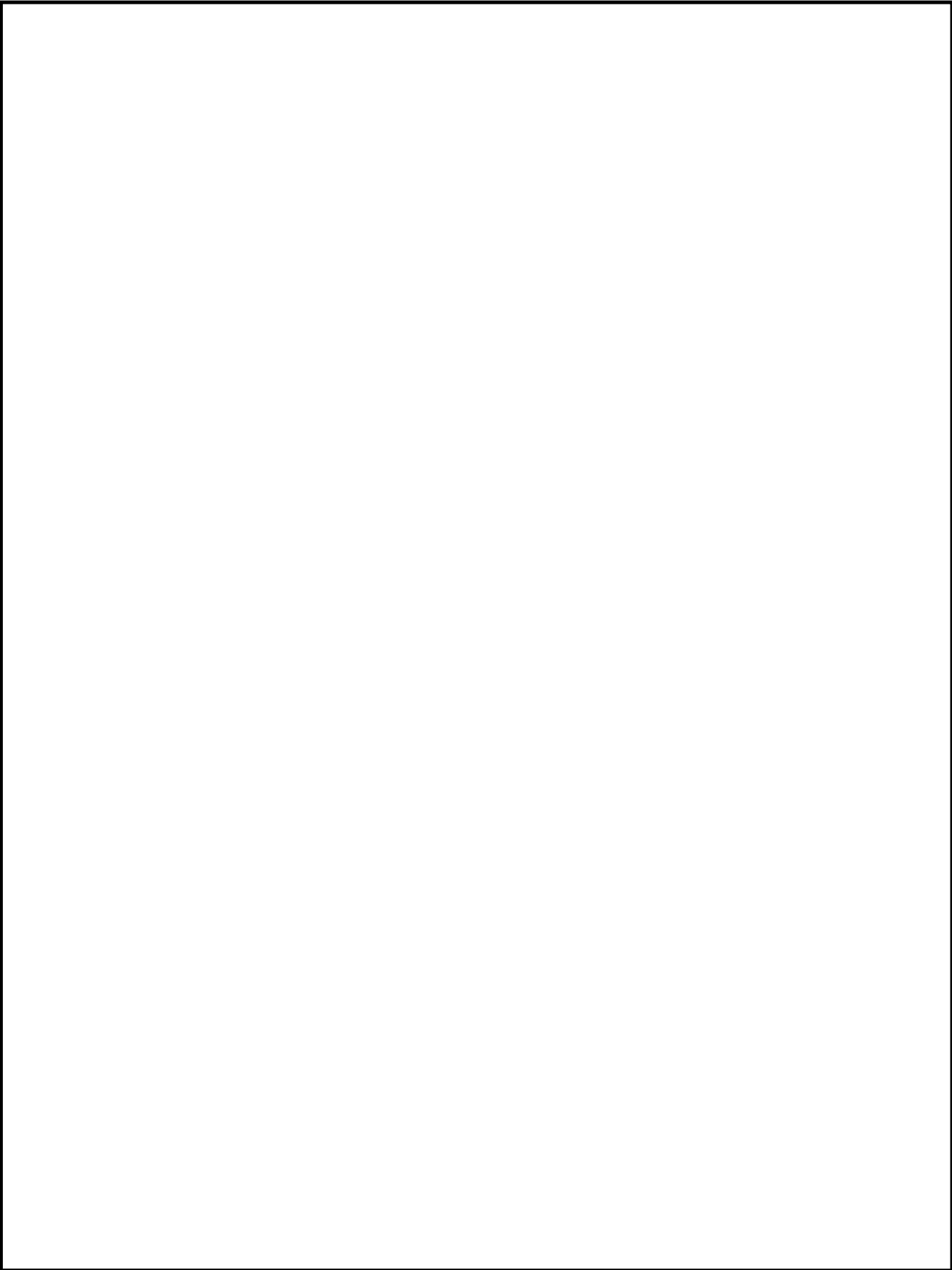
При моделюванні вибрані типові вузли, які найчастіше зустрічаються при паюванні деталей, «циліндр-циліндр», що є осесиметричними. Завдяки спеціальному класу осесиметричних елементів комплексу ANSYS для зменшення часу моделювання тривимірні моделі вузлів замінені еквівалентними осесиметричними. Вибрано двовірний елемент осесиметричного напружено-деформованого стану Plane 182.

Елемент Plane 182 визначається вісьма вузлами, що мають два ступеня свободи в кожному вузлі: переміщення у напрямі осей X і Y вузлової системи координат.

					MP 8.132.6121м.01.06.02. ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нат. Елемент може використовуватися як плоский (з плоским напруженим або деформованим станом) або як осесиметричний елемент. Елемент має властивості пластичності, повзучості, радіаційного набухання, збільшення жорсткості за наявності навантажень, великих переміщень і великих деформацій.

					MP 8.132.6121м.01.06.02. ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					МР 8.131.6121м.01.06.03. ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження напружено-деформованого стану при з'єднанні міді з тугоплавким матеріалом в пружному стані			Літ.		Арк.	Аркуші
Розробив		Барабаш М.С.									
Перевірів		Матвієнко М.В.								30	
Рецензент								ХННІ НУК			
Н. Контр.											
Зав. каф.											

3. Дослідження напружено-деформованого стану при з'єднанні міді з тугоплавким матеріалом в пружному стані

В пружному стані деформації зворотні, і вся енергія, витрачена на деформування, при розвантаженні вертається. Для будь-якого твердого тіла процес деформування починається із пружної деформації.

Моделювання проводилось у середовищі комп'ютерного продукту ANSYS, - багатоцільовий продукт, який є програмним засобом аналізу великого кола інженерних дисциплін, що дозволяє проводити розрахункові дослідження не тільки в таких напрямках знань, як міцність, розповсюдження тепла, механіка рідини і газів або електромагнетизм, але і вирішувати зв'язні задачі. Розраховувалась осесиметрична задача. Розподіл моделей на кінцеві елементи зображено на рис. 3.1.

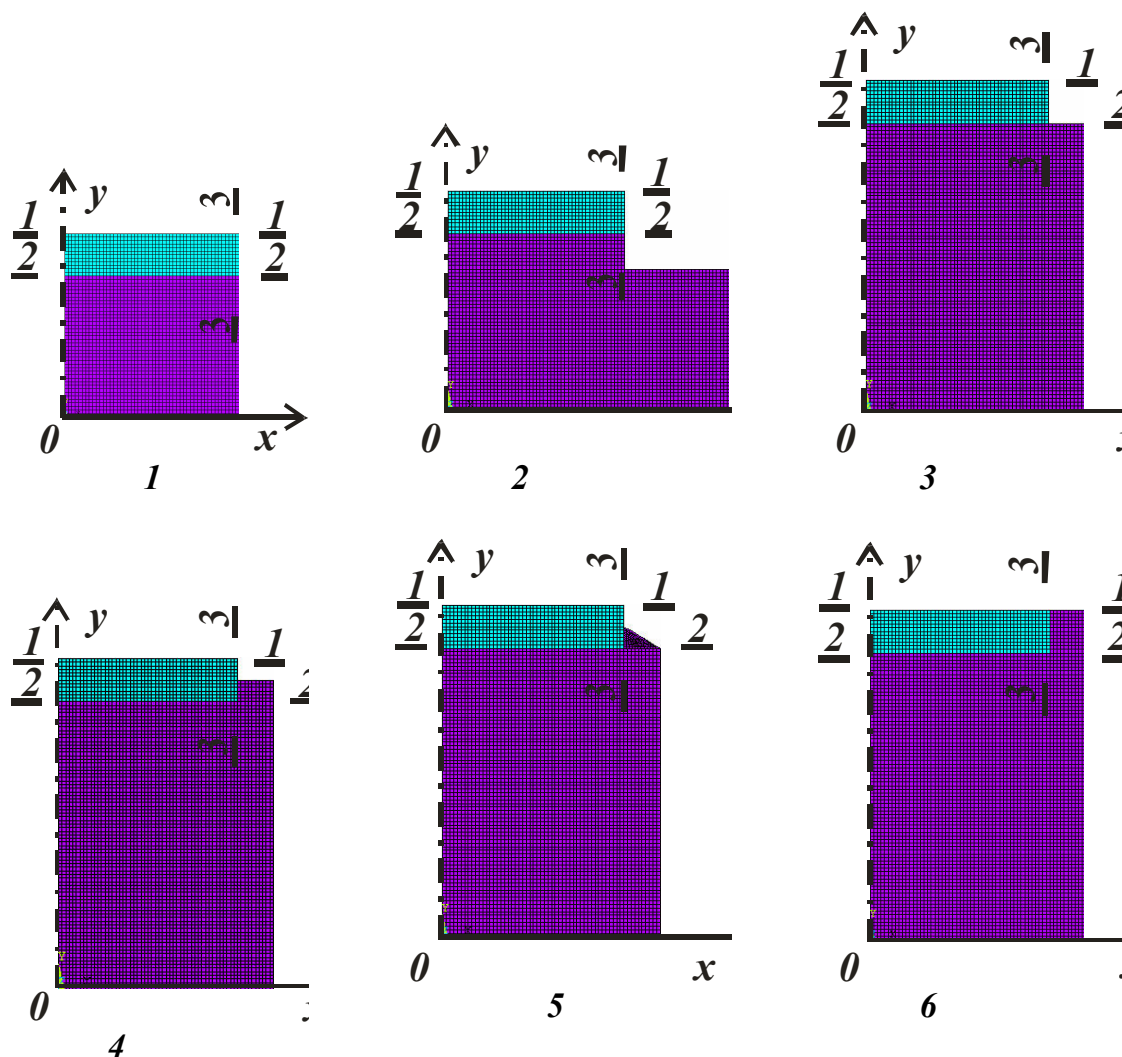


Рисунок 3.1. Скінчено-елементні моделі варіантів конструкції катодів

Переріз 1-1 проходить через торцеву поверхню тугоплавкого матеріалу, 2-2 – через матеріал випаровувача катоду в стику, 2'-2' - через матеріал корпусу катоду в стику, 3-3 – по боковій поверхні тугоплавкого металу.

Класифікацію моделей за їх розрахунковим перерізом представлено в таблиці 2.1. Теплофізичні властивості матеріалів вказані в таблиці 2.5.

Оцінка напружено-деформованого стану розрахованих моделей проводилась за критеріями: розподіл напружень в розрахунковому перерізі; розподіл напружень в тугоплавкому матеріалі - випаровувачі; рівень напружень в корпусі катоду; рівень напружень в тугоплавкому матеріалі; розподіл напружень по поверхнях тугоплавкого матеріалу.

Досліджено напружено-деформований стан при з'єднанні міді з ніобієм в пружному стані, визначено оптимальний конструкційний варіант катоду.

В результаті розрахунків отримано поля: радіальних напружень σ_x (рис. 3.4); осьових напружень σ_y (рис. 3.9); тангенціальних напружень σ_z (рис. 3.15); дотичних напружень τ_{xy} (рис. 3.18); еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ (рис. 3.23).

3.1. Дослідження конструкцій за радіальними напруженнями

Максимальні радіальні напруження σ_x (рис. 3.2) зосереджені в мідному корпусі. В 1, 2 та 3-му варіантах найбільш небезпечна точка знаходиться в центрі мідного корпусу поблизу стику. А в 4, 5 та 6 варіантах вона знаходиться біля з'єднання крайки мідного корпусу з ніобієм.

Поля радіальних напружень σ_x в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції, зображені на рис. 3.3. Максимальні радіальні напруження розтягу у всіх конструктивних моделей знаходяться на крайці зовнішньої торцевої поверхні випаровувача.

Для зручності порівняння варіантів і вибору оптимальної конструкції на рис. 3.4 та 3.5 приведено відносні величини максимальних радіальних напружень в мідному корпусі катоду, відносні величини максимальних напружень в тугоплавкому матеріалі.

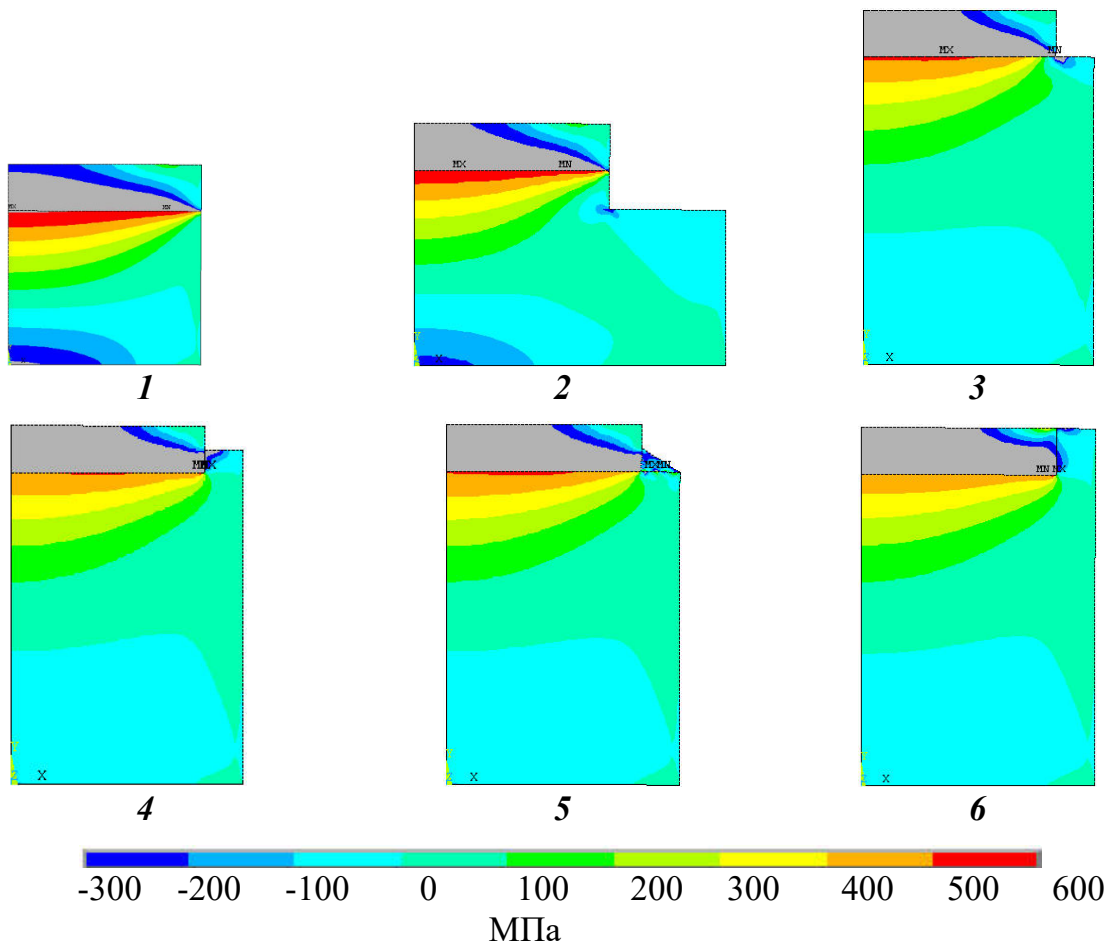


Рисунок 3.2. Поля радіальних напружень σ_x у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6

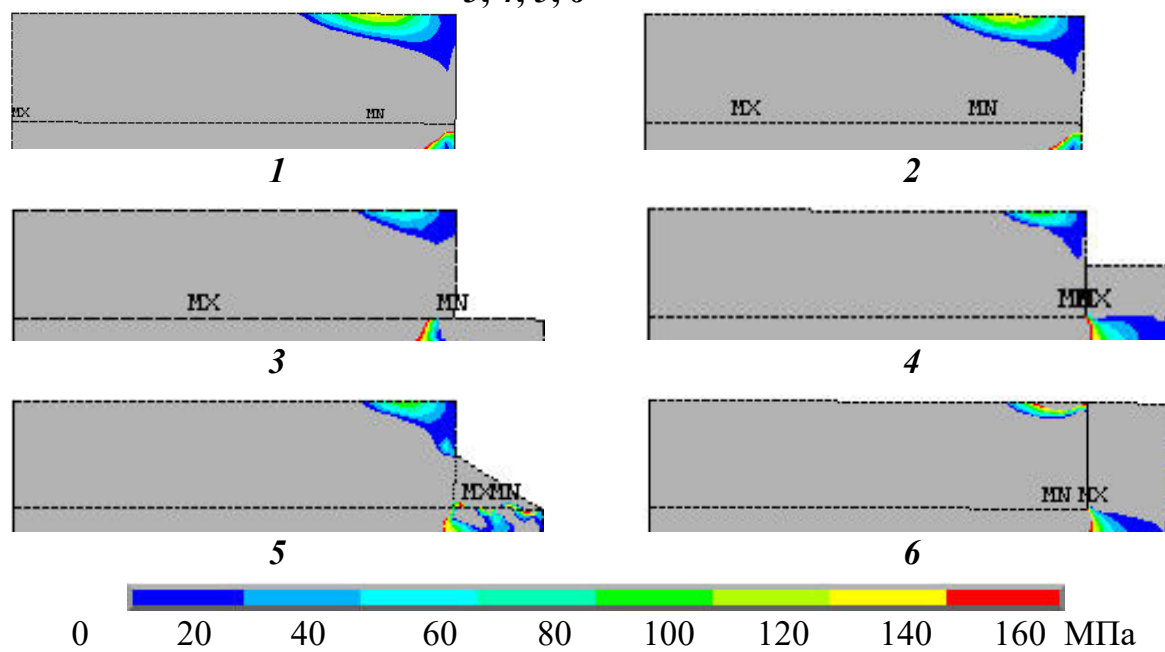


Рисунок 3.3. Поля радіальних напружень σ_x в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР 8.132.6121м.01.06.03. ПЗ

Арк.
33

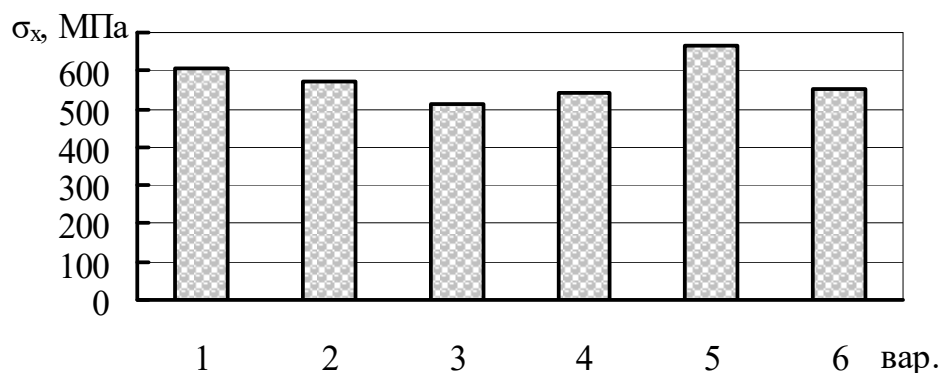


Рисунок 3.4. Рівні максимальних радіальних напружень σ_x в мідному корпусі катоду при різних варіантах конструкції вузла

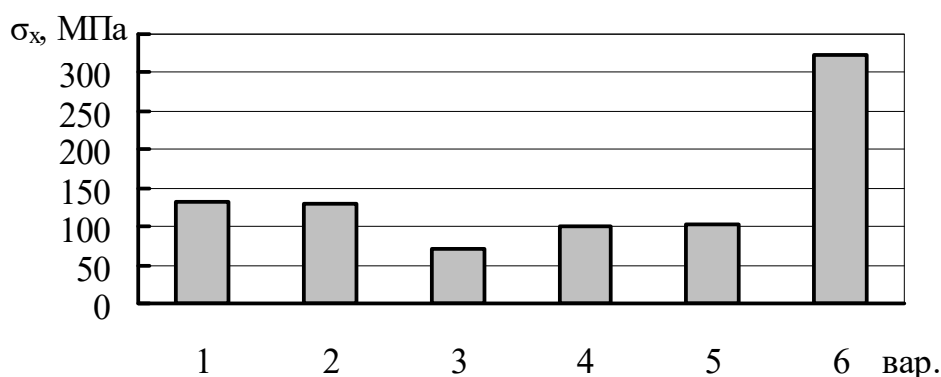


Рисунок 3.5. Рівні максимальних радіальних напружень σ_x в тугоплавкому матеріалі при різних варіантах конструкції вузла

Аналіз рівнів максимальних радіальних напружень в мідному корпусі катоду (рис. 3.4) показав, що найбільші максимальні напруження σ_x виникають у 5-му (666 МПа) і 1-му (607 МПа) варіантах. А найменші максимальні напруження – у 3-му (514 МПа). Максимальні напруження 2-го варіанту дорівнюють – 570 МПа, а 4-го – 540 МПа.

Найбільші максимальні напруження розтягу σ_x в тугоплавкому матеріалі (рис. 3.5.) виникають у 6-му (322 МПа) варіанті. А найменші максимальні напруження розтягу – у 3-му (70,2 МПа). Максимальні напруження у 1-го варіанту дорівнюють 131 МПа, у 2-го – 129 МПа, у 4-го – 100 МПа, у 5-го – 103 МПа.

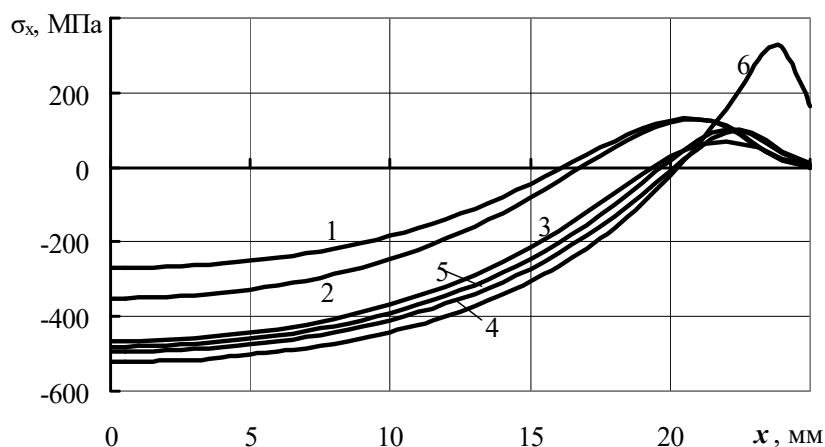


Рисунок 3.6. Епюри радіальних напружень σ_x в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6 за перерізом 1-1

Аналіз рис. 3.6, показав, що криві радіальних напружень в перерізі 1-1 всіх варіантів конструкції мають схожий характер. В середині конструкції напруження мають мінімальні значення, по мірі наближення до зовнішньої бокової поверхні, вони починають зростати, доходять до свого максимуму і зменшуються приблизно на 100 МПа. Максимум 6-го варіанту в значній мірі перевищує інші, дорівнює 322 МПа і знаходиться на меншій відстані від бокової поверхні тугоплавкого матеріалу, а саме 1 мм. Максимуми інших варіантів знаходяться на різній відстані від зовнішньої поверхні і мають невеликі відхилення один від одного. У 1 та 2-му варіантах максимум знаходиться на 5 мм від зовнішньої поверхні і дорівнює 130 МПа, у 3, 4 та 5-му - на відстані 3 мм. 3-ій варіант має мінімальне значення максимуму 70,2 МПа, а максимум 4-го дорівнює 100 МПа, 5-го – 103 МПа.

Оцінка напружено-деформованого стану розрахованих моделей за радіальними напруженнями розтягу, показала що найбільш придатними є конструкції 3 та 4-го варіантів, а гіршими - 6-го та 1-го.

3.2. Дослідження конструкцій за осьовими напруженнями

Для 1 та 2-го варіантів (рис. 3.7) на полях осьових напружень σ_u максимальні напруження знаходяться на боковій поверхні випаровувача катоду. В 3, 4, 5 та 6-му

варіантах максимальні напруження зосереджені в мідному корпусі в місці з'єднання крайки мідної основи з тугоплавким матеріалом.

Аналіз полів осьових напружень в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції, зображених на рис. 3.8, показав, що у 1, 2, 4 і 5-го варіантів максимальні напруження знаходяться на боковій поверхні випаровувача катоду, а у 3 і 6-го – на торцевій поверхні в зоні стику.

Аналіз рівнів максимальних осьових напружень (рис. 3.9) показав, що найбільші максимальні напруження σ_y в мідному корпусі катоду виникають у 5-му (857 МПа) варіанті, а найменші максимальні напруження – у 1-му (124 МПа). Максимум 2-го варіанту дорівнює 149 МПа, 3-го – 172 МПа, 4-го – 569 МПа, 6-го – 625 МПа.

Найбільші та найменші максимальні радіальні напруження розтягу σ_x в тугоплавкому матеріалі у 5-му (275 МПа) та у 6-му (81,1 МПа) варіантах відповідно (рис. 3.10). Максимальні напруження у 1-му варіанті дорівнюють 216 МПа, у 2-му – 204 МПа, у 3-му – 93,9 МПа, у 4-му – 237 МПа.

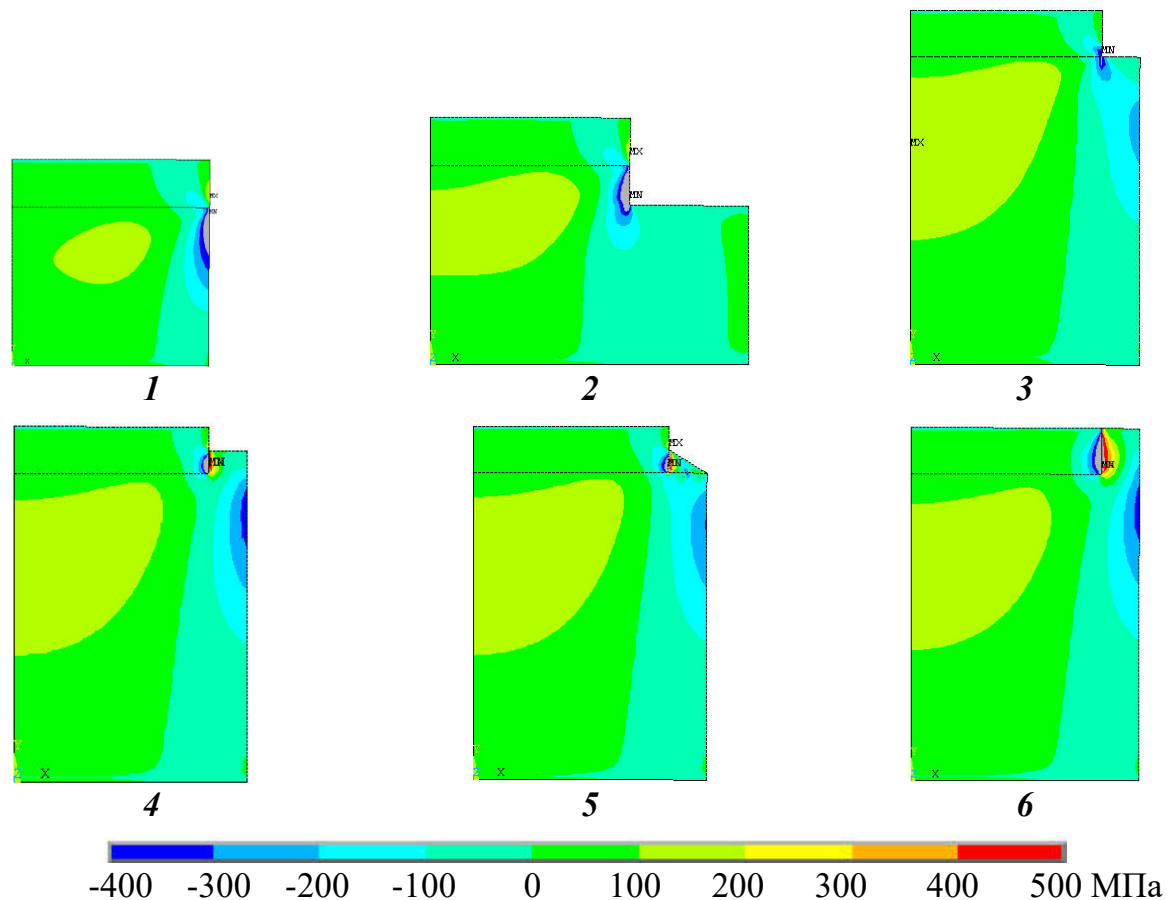


Рисунок 3.7. Поля осьових напружень σ_y у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6

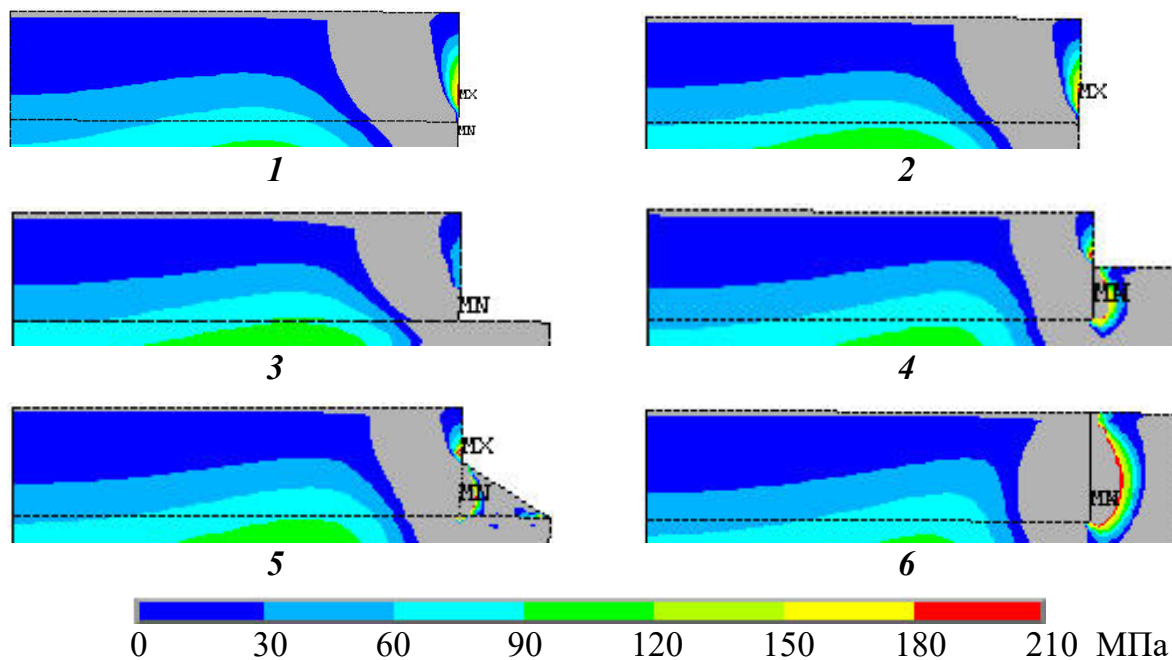


Рисунок 3.8. Поля осьових напружень σ_y в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6

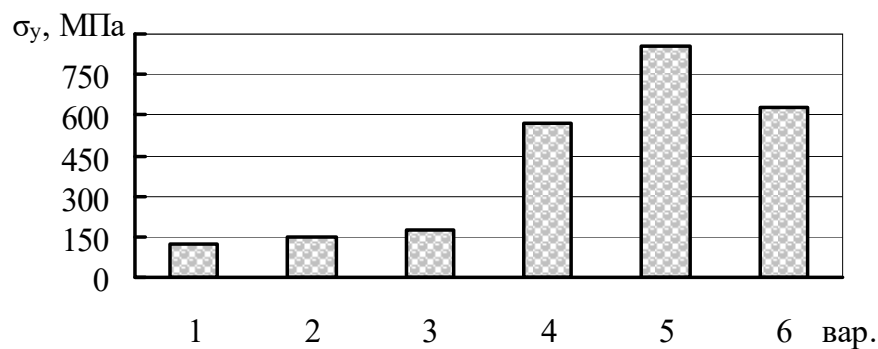


Рисунок 3.9. Рівні максимальних осьових напружень σ_y в мідному корпусі при різних варіантах конструкції вузла

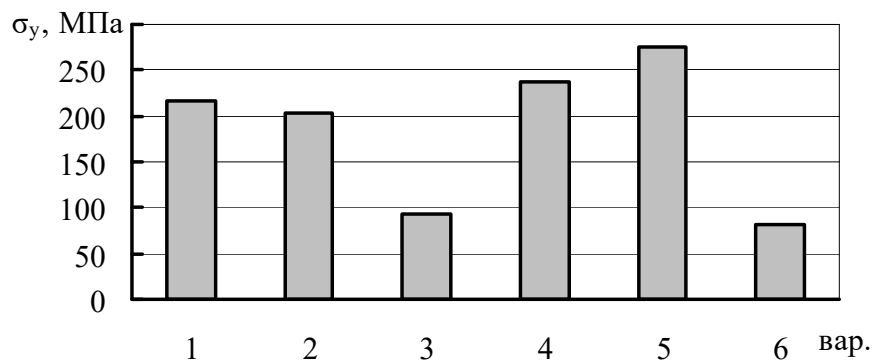


Рисунок 3.10. Рівні максимальних осьових напружень розтягу σ_y в тугоплавкому матеріалі при різних варіантах конструкції вузла

Аналіз кривих осьових напружень за перерізом 3-3 (рис. 3.11) показав, що у 1 та 2-го варіантів характер кривих майже однаковий, у місці стику вони мають напруження рівні 22,5 МПа та 3,14 МПа відповідно. Максимальні напруження приблизно однакові та знаходяться в тугоплавкому матеріалі на відстані 1,5 мм від стику і дорівнюють 215 МПа у 1-му варіанті та 204 МПа у 2-му.

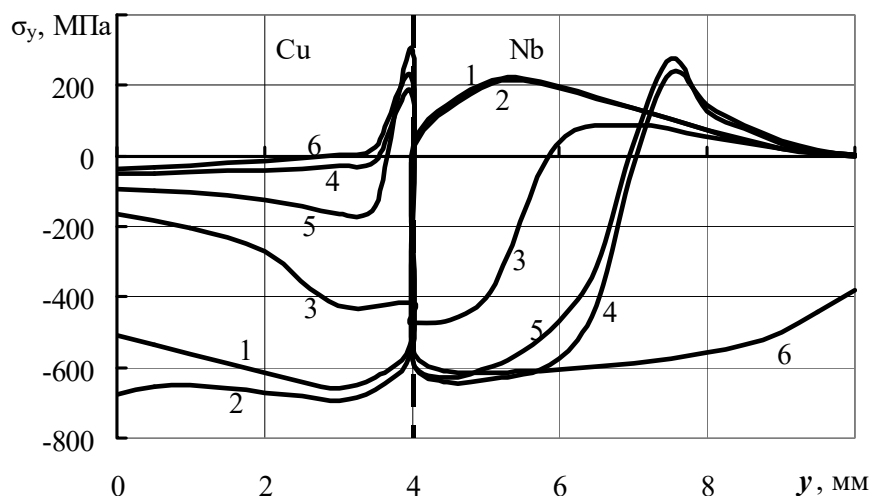


Рисунок 3.11. Епюри осьових напружень σ_y у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6 за перерізом 3-3

Криві 3, 4 та 5 варіантів мають схожий характер. Максимуми кривих 4 і 5-го варіантів знаходяться в тугоплавкому матеріалі на відстані 3 мм від зовнішньої поверхні випаровувача катоду і дорівнюють 237 МПа та 275 МПа відповідно. Максимум напружень кривої 3-го варіанту знаходиться на відстані 4 мм від зовнішньої поверхні випаровувача катоду і дорівнює 63 МПа. Напруження кривої 6-го варіанту у місці стику в тугоплавкому матеріалі дорівнює -546 МПа, а мінімум дорівнює -612 МПа. Значення напружень всіх кривих по мірі наближення до поверхні випаровувача катоду стають близькими до нуля, тільки напруження кривої 6-го варіанту на поверхні мають значення -383 МПа.

Аналіз кривих за перерізом 2-2 (рис.3.12) показав, що криві всіх варіантів конструкції мають схожий характер. Напруження кривих від середини випаровувача починають зростати до максимумів (рівних у 1-го варіанту 74 МПа, у 2-го 85 МПа, у 3-го 94 МПа, у 4-го 85 МПа, у 5-го 89 МПа та у 6-го 80 МПа) на відстані 7 мм від

бокової поверхні, а потім зменшуватись. У 1 та 2-му варіантах спостерігається невелике зростання напружень після досягнення мінімуму (-122 МПа та -144 МПа) на відстані 1 мм від бокової поверхні до напружень рівних 25 МПа та 22,5 МПа відповідно.

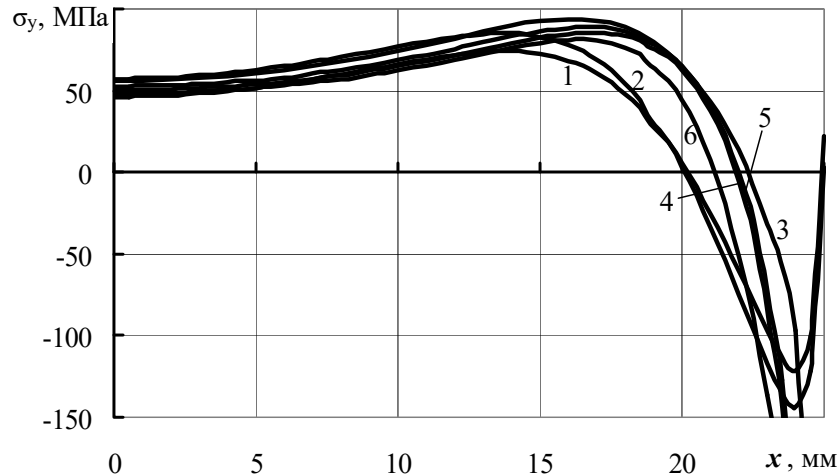


Рисунок 3.12. Епюри осевих напружень σ_y в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6 за перерізом 2-2

Оцінка напружено-деформованого стану розрахованих моделей за осевими напруженнями розтягу, показала що найбільш придатною є конструкція 6-го варіанту, а гіршою - 5-го.

3.3 Дослідження конструкцій за тангенціальними напруженнями

Максимальні тангенціальні напруження σ_z (рис. 3.15) зосереджені в мідному корпусі катоду. В 1, 2, 3 та 4-му варіантах напруження концентруються в центрі мідного корпусу поблизу стику. А в 5 та 6-му варіантах вона знаходиться біля з'єднання крайки основної частини з тугоплавким матеріалом. Тангенціальні напружень розтягу σ_z в тугоплавкому матеріалі при різних варіантах конструкції вузла відсутні.

Як видно з рис. 3.16, найбільші максимальні тангенціальні напруження розтягу σ_z виникають у 6-му (676 МПа) і 5-му (628 МПа) варіантах. А найменші максимальні напруження – у 4-му (508 МПа) і 3-му (514 МПа) варіантах. У 2-му варіанті

максимальні напруження дорівнюють 572 МПа.

Аналіз кривих всіх варіантів конструкції, зображених на рис. 3.17, показав, що вони мають схожий характер. Крива 6-го варіанту відрізняється сходженням до максимуму напруження (-74,1 МПа) на відстані 2 мм від бокової поверхні випаровувача та спадом (до -171 МПа) на боковій поверхні. Максимуми напружень інших конструктивних варіантів знаходяться на відстані 2,5 мм від бокової поверхні тугоплавкого матеріалу і мають невеликі відхилення один від одного. Максимум напружень 1 та 2-го варіантів знаходиться на відстані 3 мм від зовнішньої поверхні і дорівнює -7,9 МПа та -34,5 МПа, максимуми напружень кривих 4 та 5-го варіантів знаходиться на відстані 2 мм від зовнішньої поверхні і дорівнює -125 МПа та -114 МПа, 3-го знаходиться на боковій поверхні випаровувача і дорівнює -110 МПа.

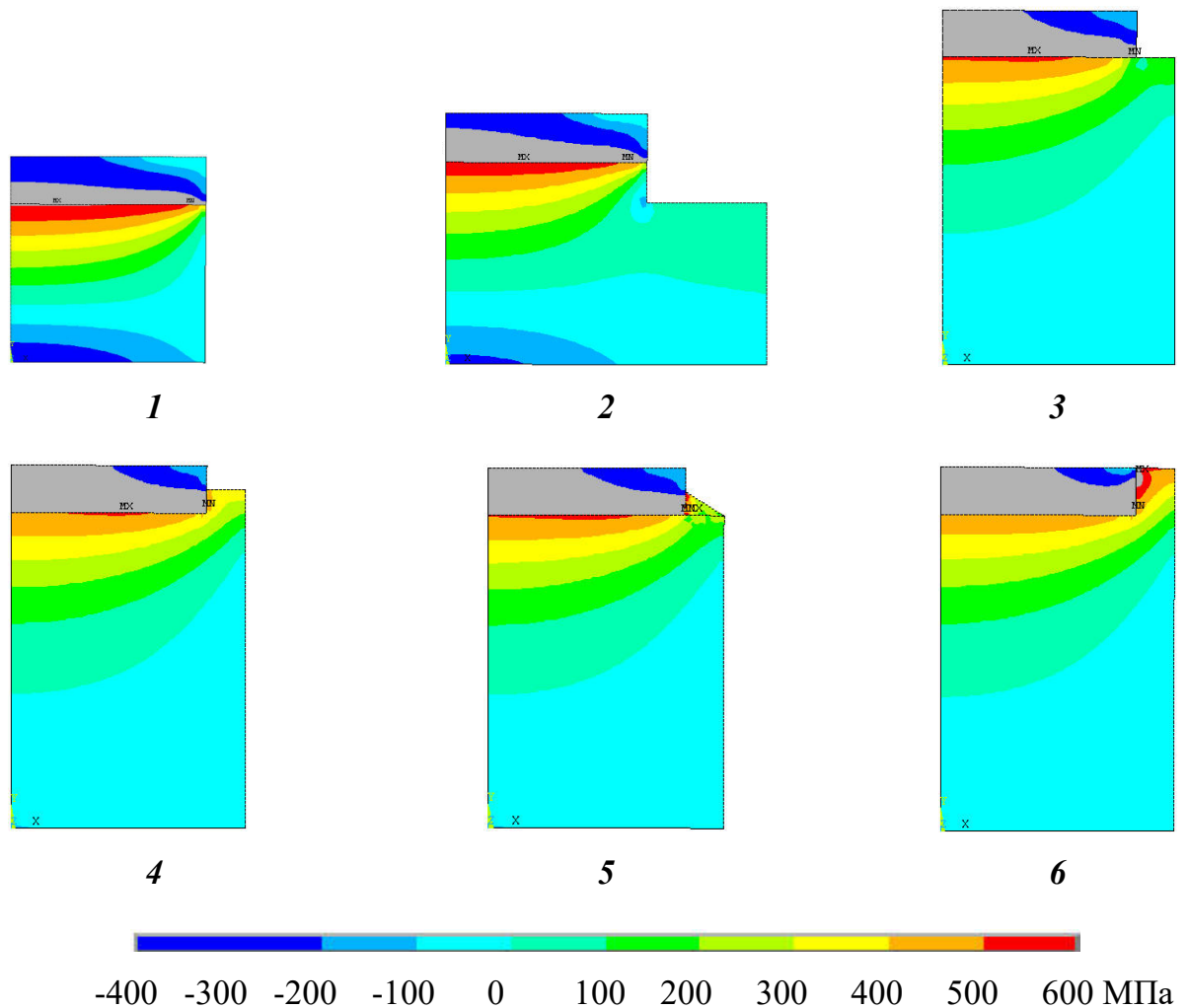


Рисунок 3.15. Поля тангенціальних напружень σ_z у варіантах конструкції 1-6

					МР 8.132.6121м.01.06.03. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Оцінка напружено-деформованого стану розрахованих моделей за тангенціальні напруженнями розтягу, показала що придатними є всі конструкції.

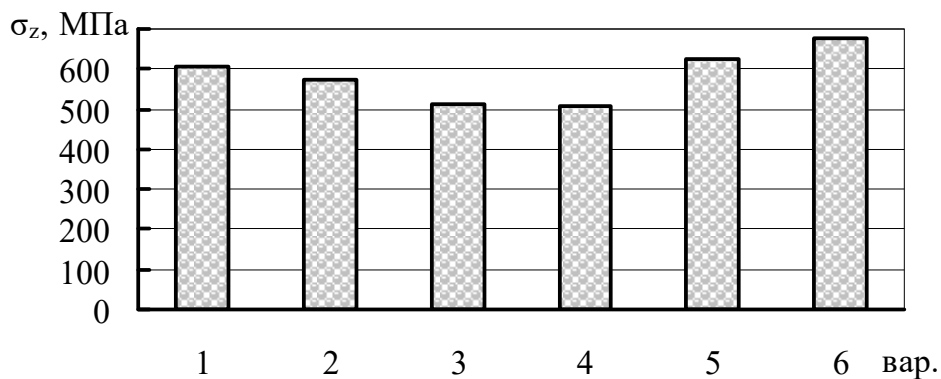


Рисунок 3.16. Рівні максимальних тангенціальних напружень σ_z в мідному корпусі при різних варіантах конструкції вузла

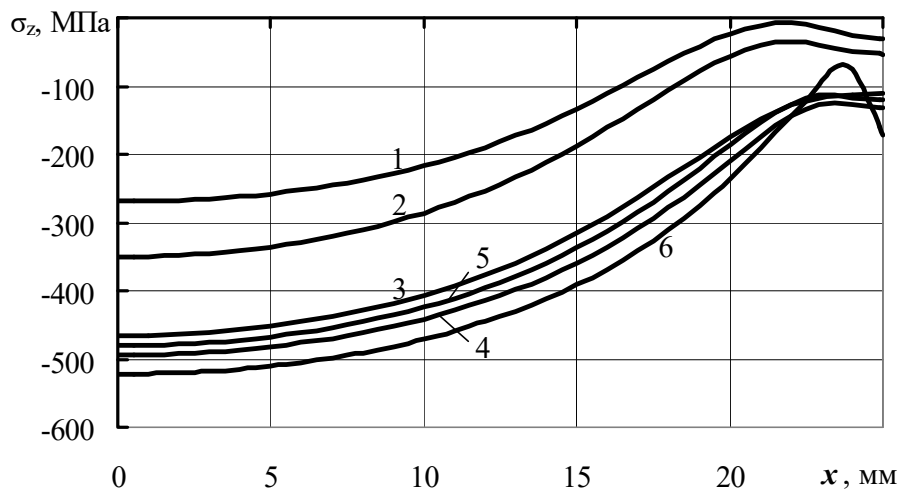


Рисунок 3.17. Епюри тангенціальні напружень σ_z в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6 за перерізом 1-1

3.4 Дослідження конструкцій за дотичними напруженнями

Аналіз отриманих полів дотичних напружень τ_{xy} (рис. 3.18) показав, що максимальні напруження у всіх конструктивних моделях катоду знаходяться на поверхні як мідного корпусу, так і тугоплавкого матеріалу випаровувача в зоні стику поблизу крайки.

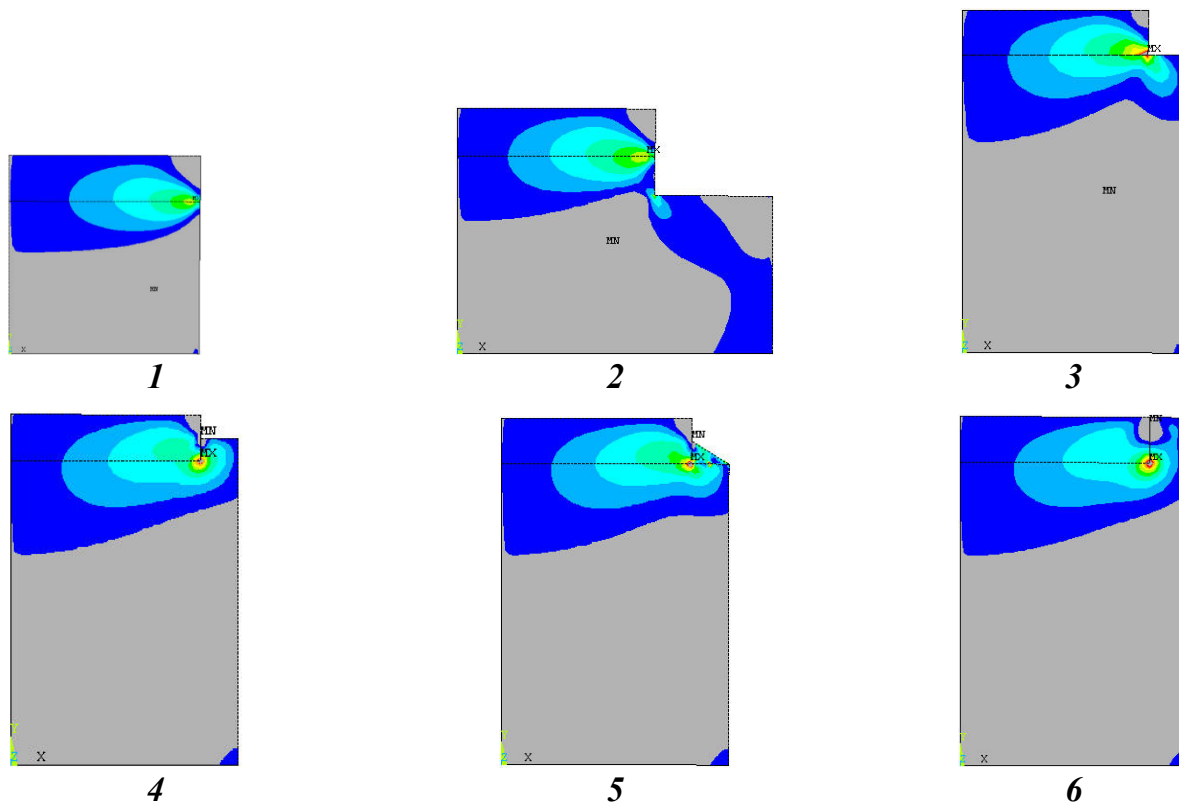


Рисунок 3.18. Поля дотичних напружень τ_{xy} у варіантах конструкції 1-6

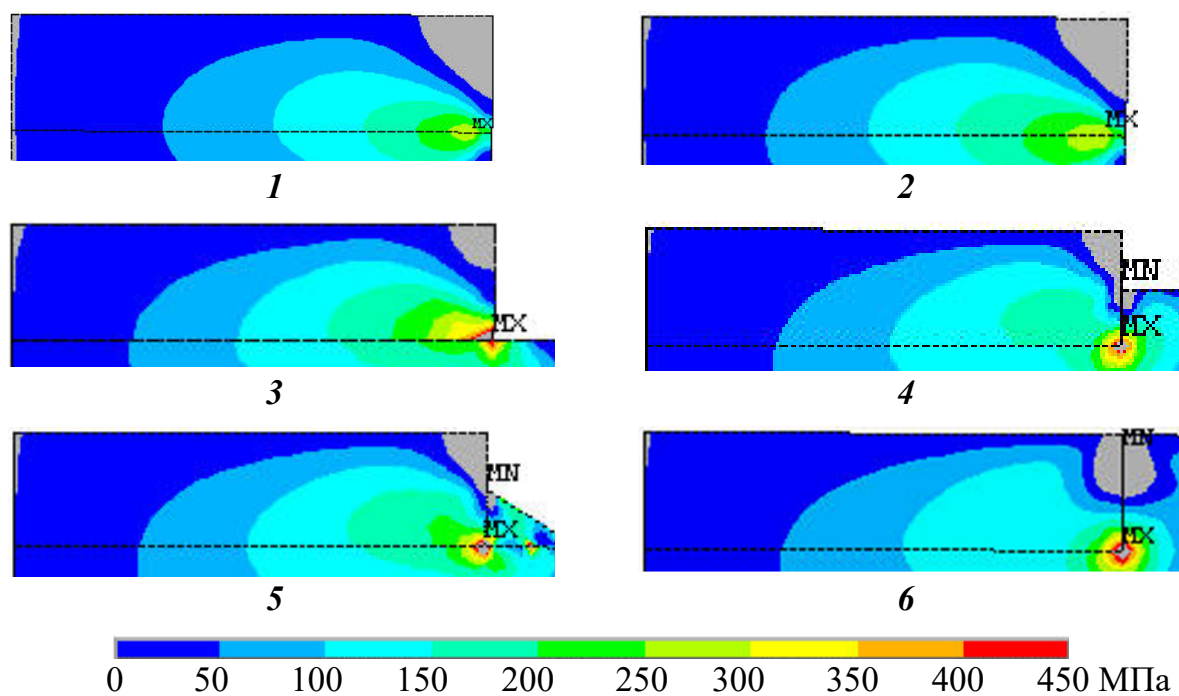


Рисунок 3.19. Поля дотичних напружень τ_{xy} в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1- 6

Концентрація напружень на рис. 3.19 у 1 та 2-му варіантах знаходиться в зоні стику на торцевій поверхні поблизу бокової поверхні випаровувача катоду, в інших - аналогічно розподілу на рис. 3.18.

Як видно з рис. 3.20 найбільші максимальні дотичні напруження τ_{xy} в мідному корпусі виникають у 5-му (822 МПа) і 3-му (779 МПа) варіантах. А найменші максимальні напруження – у 1-му (281 МПа) і 2-му (293 МПа) варіантах. У 4-му варіанті максимальні напруження дорівнюють 600 МПа, а у 6-му – 646 МПа.

Найбільший рівень максимальних дотичних напружень τ_{xy} (рис. 3.21) в тугоплавкому матеріалі спостерігається у 3-му (779 МПа), а найменший у 1 та 2-му варіантах (289 МПа та 299 МПа відповідно). У 4, 5 та 6-му варіантах рівні максимальних напружень дорівнюють 553 МПа, 655 МПа та 599 МПа відповідно.

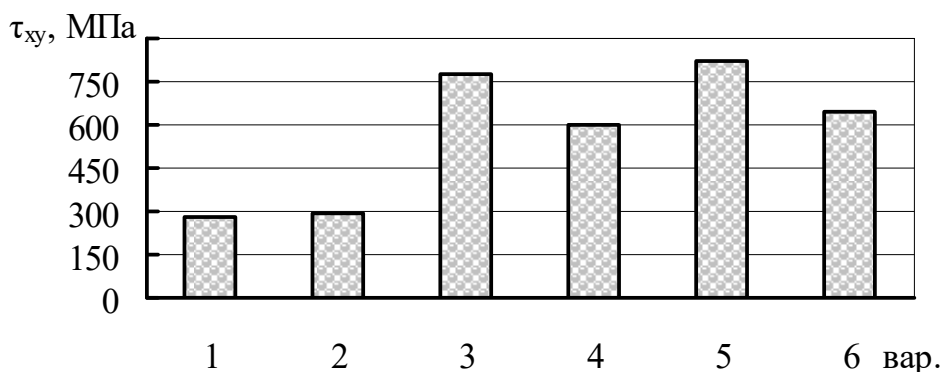


Рисунок 3.20. Рівні максимальних дотичних напружень τ_{xy} в мідному корпусі при різних варіантах конструкції вузла

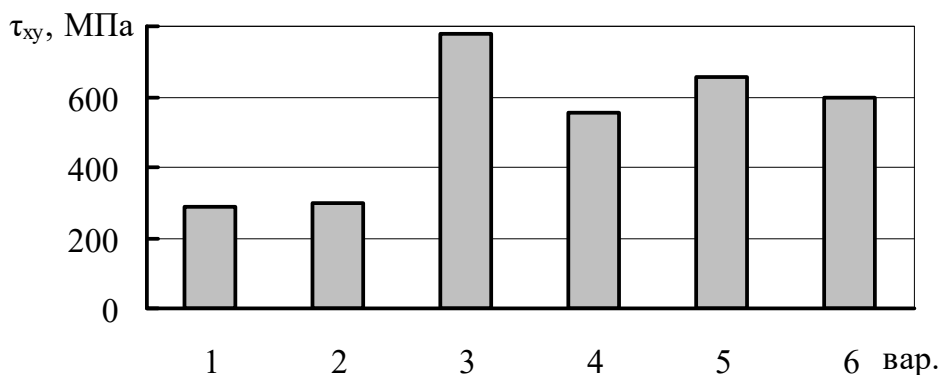


Рисунок 3.21. Рівні максимальних дотичних напружень τ_{xy} в тугоплавкому матеріалі при різних варіантах конструкції вузла

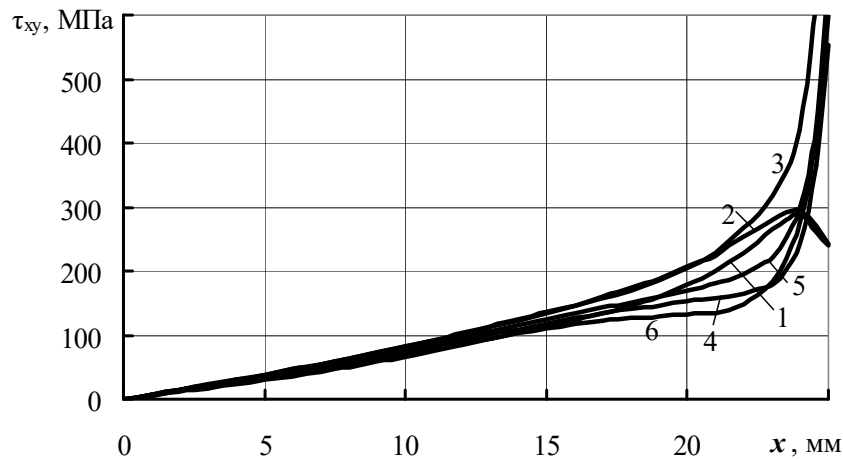


Рисунок 3.22. Епюри дотичних напружень τ_{xy} в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1-6 за перерізом 2-2

На рис. 3.22 криві дотичних напружень всіх варіантів конструкції мають майже однаковий характер, тільки при наближенні до зовнішньої поверхні з'являються невеликі відмінності. Максимум напружень кривих 1 та 2-го варіантів знаходиться біля бокової поверхні і дорівнює 289 МПа та 299 МПа відповідно. Для всіх інших варіантів, 3, 4, 5, 6-го, максимум знаходиться на самій поверхні і дорівнює 779 МПа, 553 МПа, 655 МПа та 599 МПа відповідно.

Оцінка напружено-деформованого стану розрахованих моделей за дотичними напруженнями, показала що найбільш придатними є конструкції 1 та 2-го варіантів, а гіршою - 3-ого.

3.5 Дослідження конструкцій за еквівалентними напруженнями

Максимальні еквівалентні напруження секв (рис. 3.23) у 1 та 2-му варіантах знаходиться в мідному корпусі, а в 3, 4, 5 та 6-му варіантах - в тугоплавкому матеріалі, біля з'єднання випаровувача з крайкою мідного корпусу катоду.

Концентрація еквівалентних напружень секв в тугоплавкому матеріалі на полях, зображених на рис. 3.24 аналогічна концентрацій в конструкціях на полях, зображених на рис. 3.23.

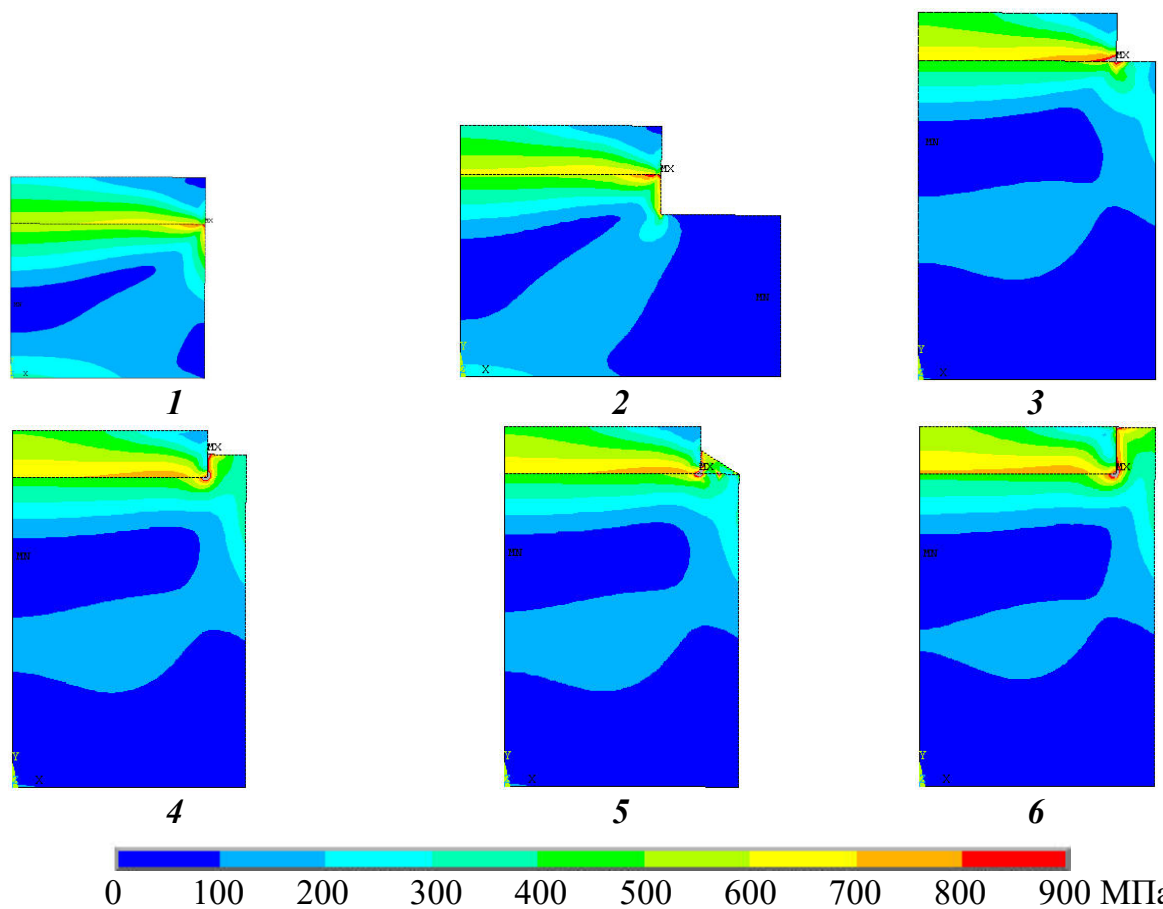


Рисунок 3.23. Поля еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6

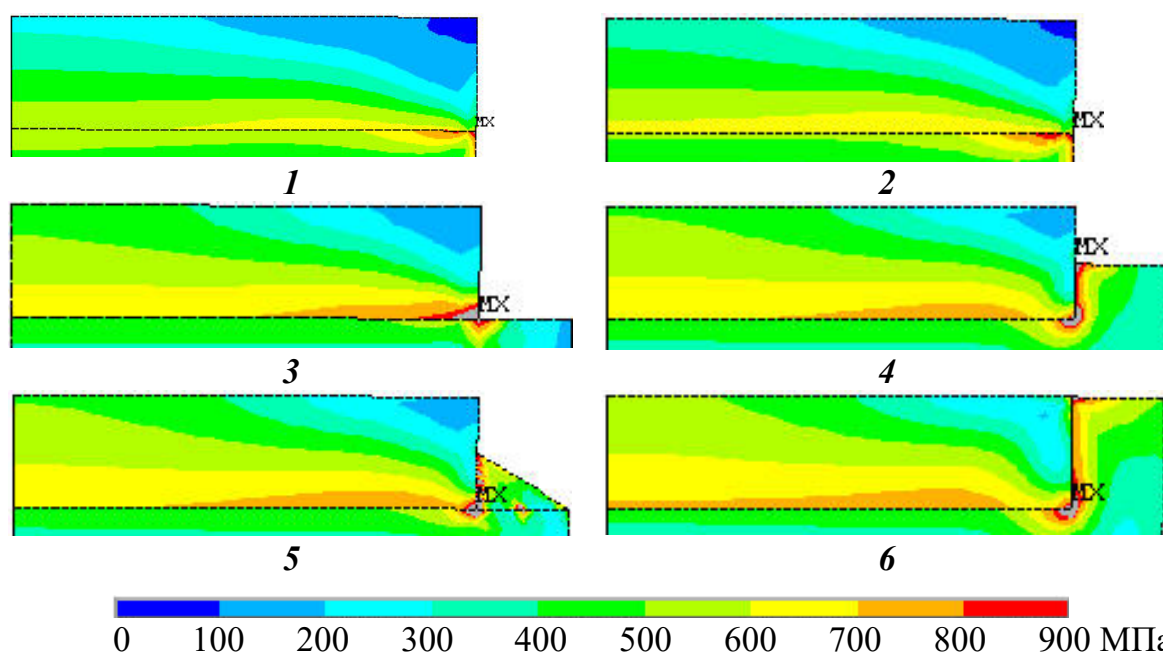


Рисунок 3.24. Поля еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6

Як видно з рис. 3.25 найбільші максимальні еквівалентні напруження секв виникають у 5 (1430 МПа) і 6-му (1140 МПа) варіантах. А найменші максимальні напруження – у 1 (956 МПа), 2 (973 МПа) та 3-му (944 МПа) варіантах. У 4-му рівень максимальних напружень дорівнює 1170 МПа.

Найбільший рівень максимальних еквівалентних напружень секв в тугоплавкому матеріалі (рис. 3.26) у 3-му варіанті конструкції (1380 МПа), а найменший у 1-му (649 МПа) та у 2-му (694 МПа). Рівень максимальних еквівалентних напружень секв в тугоплавкому матеріалі в 4-му варіанті дорівнює 970 МПа, у 5-му – 1140 МПа, у 6-му – 1050 МПа.

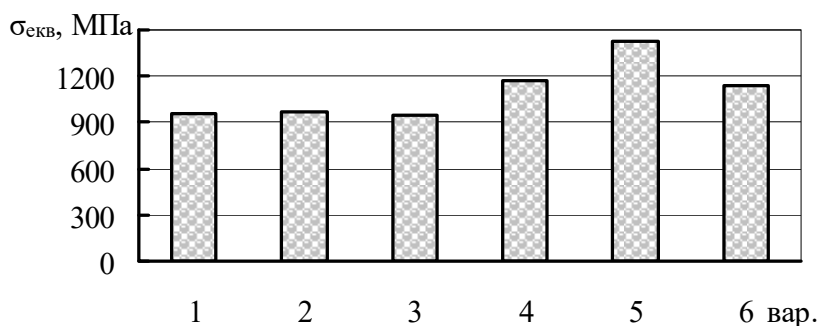


Рисунок 3.25. Рівні максимальних еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ в мідному корпусі при різних варіантах конструкції вузла

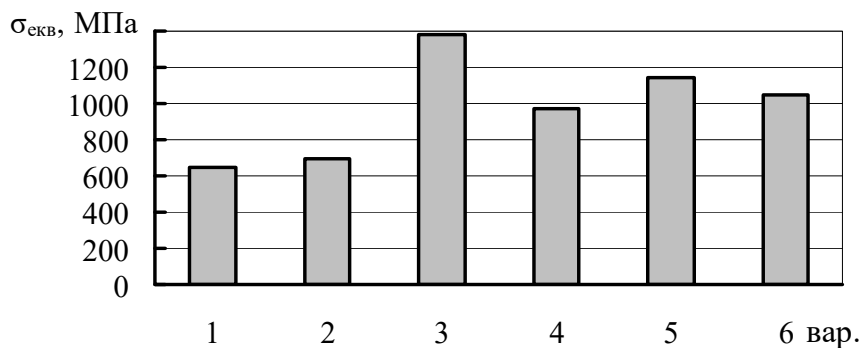


Рисунок 3.26. Рівні максимальних еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ в тугоплавкому матеріалі при різних варіантах конструкції вузла

Характери кривих напружень (рис. 3.27) всіх варіантів конструкції за перетином 2-2 схожі. Характер кривих напружень 3, 4, 5 та 6-го варіантів майже однаковий, тільки при наближенні до зовнішньої поверхні з'являються невеликі відмінності. У 1 та 2-му варіантах максимум кривих напруження знаходиться на відстані 7,5 мм від

поверхні випаровувача і дорівнює 596 МПа. Для всіх інших варіантів, 3, 4, 5, 6-го, максимум знаходиться на боковій поверхні випаровувача катоду і дорівнює 1380 МПа, 970 МПа, 1140 МПа та 1050 МПа відповідно.

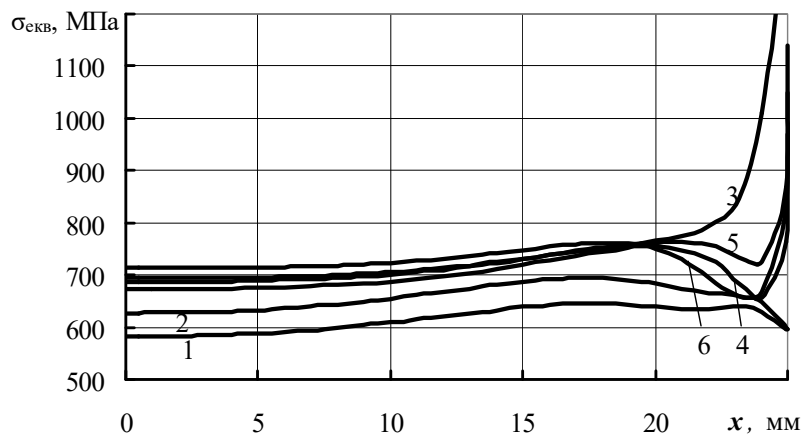


Рисунок 3.27. Епюри еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6 за перерізом 2-2

Аналіз рис. 3.28, показав, що криві еквівалентних напружень в перерізі 2'-2' в мідному корпусі всіх варіантів конструкції мають схожий характер. В середині конструкції напруження мають мінімальні значення, по мірі наближення до зовнішньої бокової поверхні, вони починають зростати, досягаючи до свого максимуму, що знаходиться на боковій поверхні випаровувача. Максимуми 1, 2, 3, 4, 5 та 6-го варіантів конструкції дорівнюють значенням 956 МПа, 973 МПа, 944 МПа, 1060 МПа, 1430 МПа та 1140 МПа.

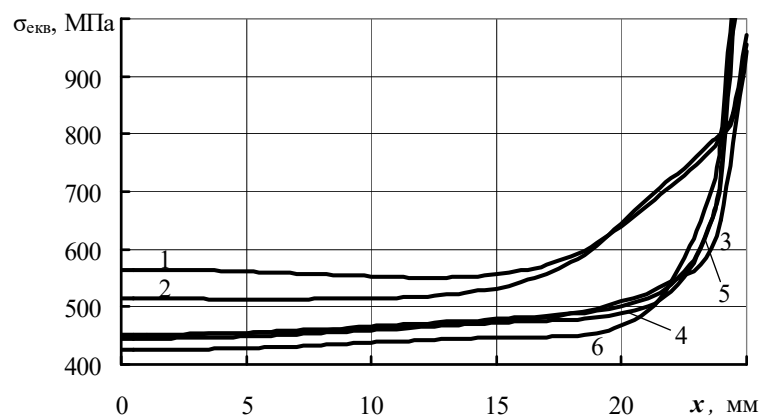


Рисунок 3.28. Епюри еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ в міді в зоні стику у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6 за перерізом 2'-2'

Оцінка напружено-деформованого стану розрахованих моделей за еквівалентними напруженнями, показала що найбільш придатною є конструкції 5 і 4-го варіантів, а гіршою - 3-го.

3.6 Порівняння результатів досліджень

Для зручності порівняння варіантів і вибору оптимальної конструкції приведено рівні максимальних напружень розтягу в тугоплавкому матеріалі рис. 3.29.

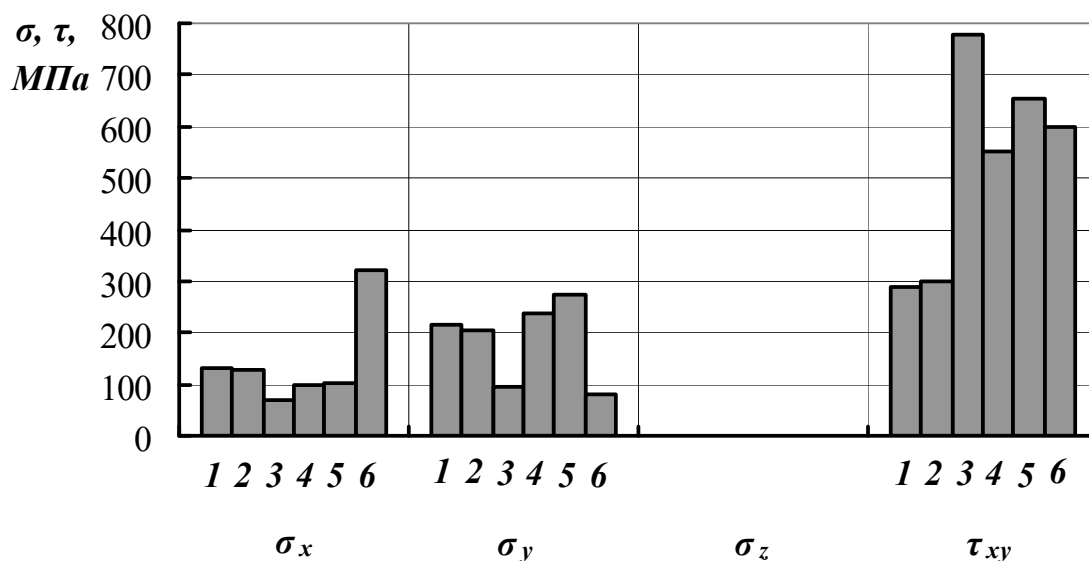


Рисунок 3.29. Рівні максимальних напружень розтягу в тугоплавкому матеріалі при різних варіантах конструкції вузла

Аналіз рівнів максимальних напружень (рис. 3.29) в тугоплавкому матеріалі показав, що:

за радіальними напруженнями розтягу кращими є 3 та 4 варіанти, гіршим в свою чергу є 6 та 1;

за осьовими напруженнями розтягу кращим є 3 варіант, гіршим – 5;

за тангенціальними напруженнями всі конструкції є придатними, оскільки напруження розтягу відсутні;

за дотичними напруженнями кращими є 1, 2 варіанти, гіршим є 3-й.

За еквівалентними напруженнями в мідному корпусі, як додатковим критерієм оцінки оптимальності, кращими є 5 і 4 варіанти, гіршим – 3-ій.

З точки зору збереження цілісності вузла можна вважати найбільш придатними конструкції 3 та 4-го варіантів, які забезпечують мінімальний рівень залишкових напружень в тугоплавкому матеріалі.

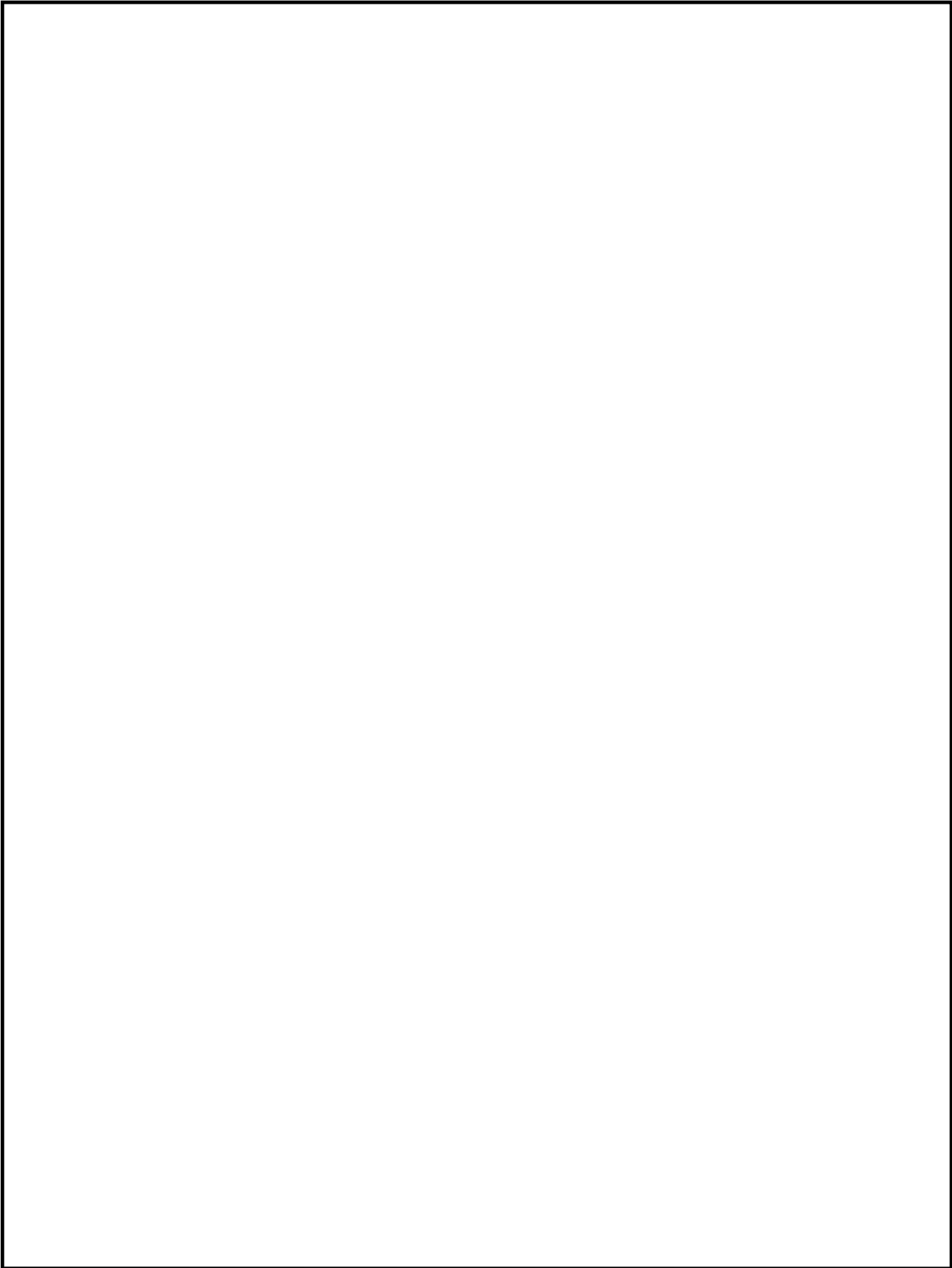
Беручи до уваги основні та додаткові критерії, оптимальним варіантом конструкції обрано 4 варіант, який є кращим за технологічними міркуваннями, а саме, точність і зручність складання.

Висновки

1. Досліджено напружено-деформований стан всіх варіантів конструкції при з'єднанні міді з ніобієм у пружному стані.

2. Отримано загальну картину розвитку напружень в конструкціях. Дослідження виконано методом комп'ютерного моделювання. Конструкція катоду Cu-Nb охолоджувалась з 700°C до 20°C . Навантаження -680°C .

3. Аналіз максимальних напружень розтягу, еквівалентних напружень в мідному корпусі та геометрії конструкцій показав, що з точки зору збереження цілісності вузла можна вважати найбільш придатним 4 варіант.



					МР 8.131.6121м.01.06.04. ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Барабаш М.С.				Дослідження напружено-деформованого стану при з'єднанні міді з тугоплавким матеріалом з врахуванням миттєвої пластичності	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірів	Матвієнко М.В.						50	
Рецензент						ХННІ НУК		
Н. Контр.								
Зав. каф.								

4. Дослідження напружено-деформованого стану при з'єднанні міді з тугоплавким матеріалом з врахуванням миттєвої пластичності

Пластичний стан характеризується наявністю залишкових деформацій, що фіксуються після зняття зовнішніх навантажень. Пластичність, яка не залежить від швидкості навантаження - характеризується незворотною миттєвою деформацією, що виникає в матеріалі.

Моделювання проводилось у середовищі комп'ютерного продукту ANSYS.

Зовнішній вигляд конструкції існуючого вузла катоду для іонно-плазмового напилення зображено на рис. 2.1, а моделі, по яким виконувались розрахунки на рис. 2.2. Розподіл моделей на скінченні елементи зображено на рис. 3.1.

Класифікацію моделей за їх розрахунковим перерізом представлено в таблиці 2.1.

Оцінка напружено-деформованого стану розрахованих моделей проводилась за критеріями:

1. Розподіл напружень в розрахунковому перерізі;
2. Рівень напружень в розрахунковому перерізі;
3. Розподіл напружень в корпусі катоду;
4. Рівень напружень в тугоплавкому матеріалі;
5. Розподіл напружень по поверхням тугоплавкого матеріалу.

Досліджено напружено-деформований стан при з'єднанні міді з ніобієм з врахуванням миттєвої пластичності, визначено оптимальний конструкційний варіант катоду.

Теплофізичні властивості вказані в таблиці 2.5.

В результаті розрахунків отримано поля: радіальних напружень σ_x (рис. 4.1); осьових напружень σ_y (рис. 4.6); тангенціальних напружень σ_z (рис. 4.12); дотичних напружень τ_{xy} (рис. 4.16); еквівалентних напружень $\sigma_{\text{екв}}$ (рис. 4.21); пластичних деформацій ε (рис. 4.27).

					MP 8.132.6121м.01.06.04. ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.1. Дослідження конструкцій за радіальними напруженнями

Аналіз отриманих полів радіальних напружень σ_r (рис. 4.1), показав, що найбільш небезпечна точка знаходиться в центрі мідного корпусу поблизу стику. Радіальні напруження в ній максимальні в усіх варіантах, тільки в 6-му варіанті максимальні напруження знаходяться на поверхні тугоплавкого матеріалу біля з'єднання з крайкою основної частини.

Аналіз розподілу радіальних напружень в тугоплавкому матеріалі (рис. 4.2) показав, що у всіх конструктивних моделях катоду напруження концентруються майже на краю торцевої зовнішньої поверхні, тільки в 6-му варіанті - біля з'єднання з крайкою основної частини.

Як видно з рис. 4.3 найбільші максимальні радіальні напруження розтягу в мідному корпусі σ_r виникають у 6 (152 МПа) і 2-му (151 МПа) варіантах. А найменші – у 1-му (134 МПа). У 4 і 5-му варіантах максимальні радіальні напруження однакові і дорівнюють 144 МПа, у 3-му – 143 МПа.

Найбільші максимальні напруження в тугоплавкому матеріалі на рис. 4.4 спостерігаються у 6-му варіанті і дорівнюють 152 МПа, а найменші максимальні у 4-му варіанті – 32 МПа. Рівень максимальних напружень в 1-му варіанті складає 74,9 МПа, 2-му – 66,4 МПа, 3-му – 35,4 МПа та 5-му – 37,8 МПа.

Характер кривих напружень всіх варіантів конструкції, зображених на рис. 4.5 один і той самий. Крива 6-го варіанту відрізняється максимумом, який в значній мірі перевищує всі інші, дорівнює 152 МПа і знаходиться на поверхні тугоплавкого матеріалу в місці з'єднання з крайкою мідного корпусу. Максимуми інших варіантів знаходяться на різній відстані від зовнішньої поверхні і мають невеликі відхилення один від одного. Для 1 та 2 варіантів максимуми знаходяться на відстані 6 мм від зовнішньої поверхні і дорівнюють 75 МПа та 66 МПа відповідно, для 3, 4 та 5 - 4 мм від зовнішньої поверхні і дорівнюють 35 МПа, 32 МПа та 37 МПа.

					MP 8.132.6121м.01.06.04. ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оцінка напружено-деформованого стану розрахованих моделей за радіальними напруженнями розтягу, показала що найбільш придатною є конструкція 4-го варіанту, а гіршою - 6-го.

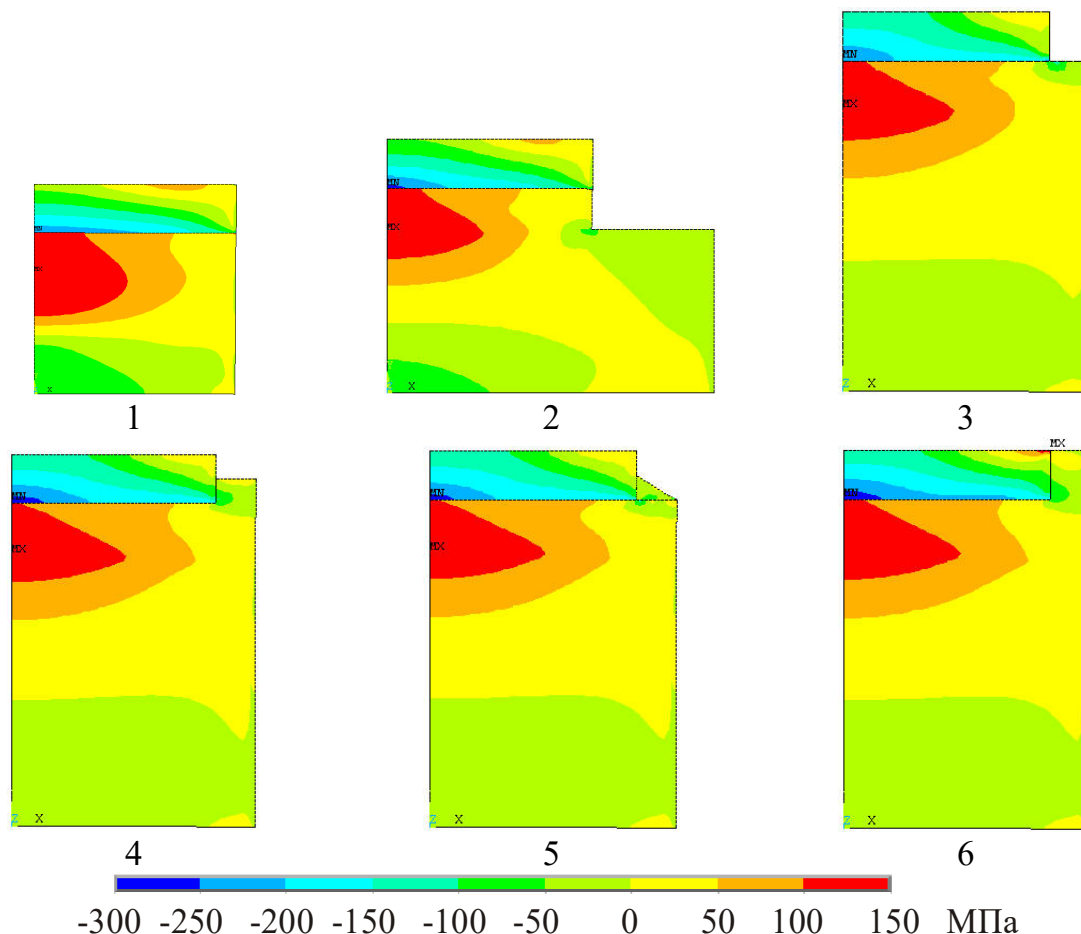
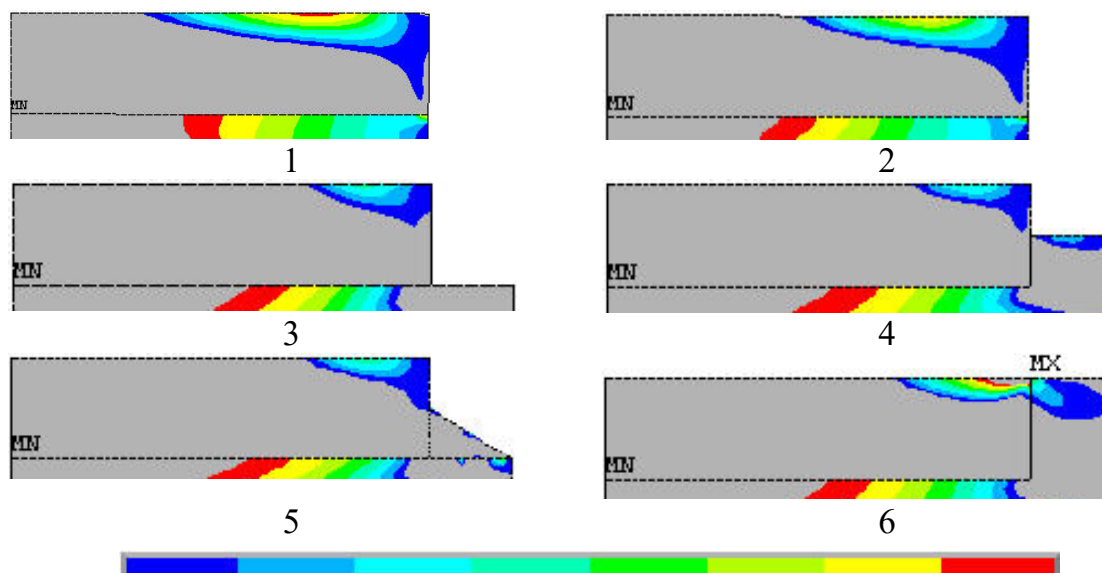


Рисунок 4.1. Поля радіальних напружень σ_x у варіантах конструкції 1-6



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP 8.132.6121м.01.06.04. ПЗ

Арк.
53

0 10 20 30 40 50 60 70 80 МПа
Рисунок 4.2. Поля радіальних напружень σ_x в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6

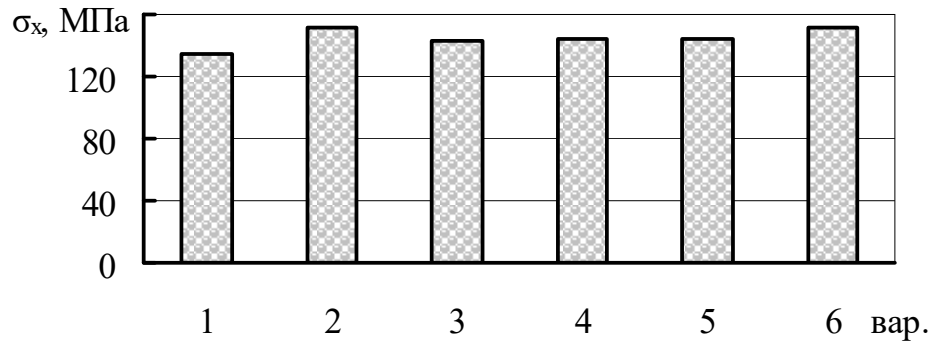


Рисунок 4.3. Рівні максимальних радіальних напружень розтягу σ_x в мідному корпусі катода при різних варіантах конструкції вузла

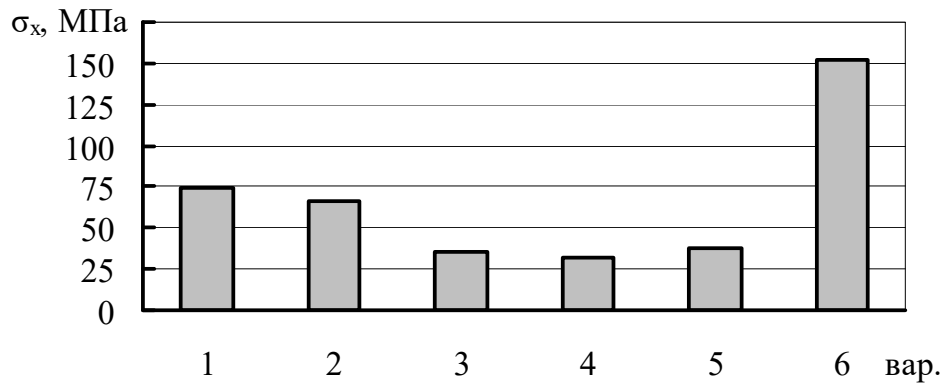


Рисунок 4.4. Рівні максимальних радіальних напружень розтягу σ_x в тугоплавкому матеріалі при різних варіантах конструкції вузла

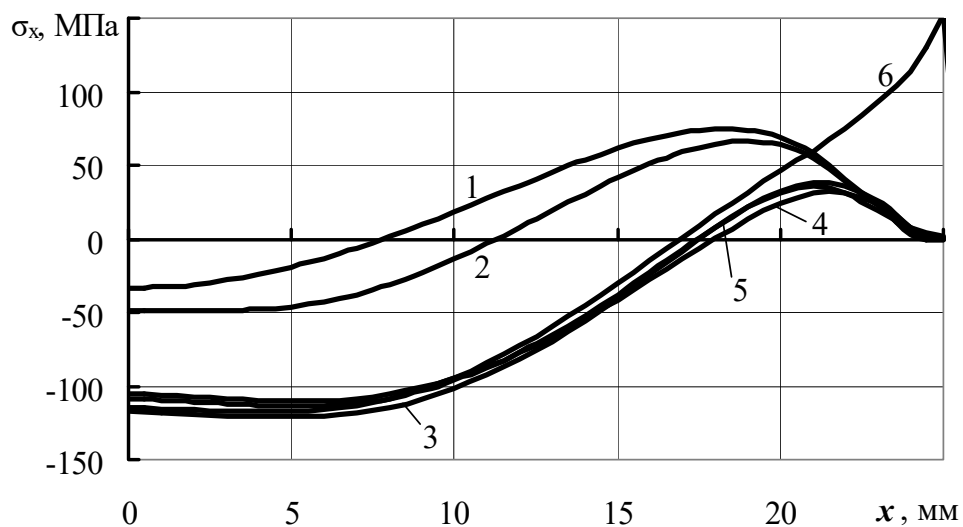


Рисунок 4.5. Епюри радіальних напружень σ_x в тугоплавкому матеріалі у

варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6 за перерізом 1-1

4.2 Дослідження конструкцій за осьовими напруженнями

Для 1 та 2-го варіантів конструкції на полях осьових напружень σ_y (рис. 4.6) небезпечні точки знаходяться: одна на боковій поверхні ніобію в зоні стику, в якій напруження максимальні; друга - в центрі мідного корпусу. Найбільш небезпечна точка для 3-6 варіантів знаходиться в центрі мідного корпусу.

Для всіх конструкцій найбільш небезпечні точки в тугоплавкому матеріалі (рис. 4.7) знаходяться: одна на боковій поверхні тугоплавкого матеріалу в зоні стику; друга - в центрі мідного корпусу.

Найменші максимальні напруження в мідному корпусі катоду (рис. 4.8) у 1 та 4-му (79,4 МПа та 79,7 МПа) варіантах. У 2, 3, 5 і 6-му варіантах максимальні радіальні напруження в конструкції близькі і відповідно дорівнюють 80,1 МПа, 81,7 МПа, 80,9 МПа і 82,5 МПа.

Як видно з рис. 4.9 найбільші максимальні напруження σ_y в тугоплавкому матеріалі виникають у 1 (195 МПа) і 2 (193 МПа) варіантах. Найменші максимальні напруження знаходяться в 6-му (31,3 МПа) та 4-му (47,0 МПа) варіантах. У 3-му варіанті рівні максимальних напружень дорівнюють 58,3 МПа, а у 5-му – 52,3 МПа.

Криві напружень 1 та 2-го варіантів ідентичні (рис. 4.10), вони тільки на початку мають невеликі відмінності в початкових напруженнях у 1-го - -91 МПа, у 2-го - -104 МПа, які потім зростають до максимумів рівних 193 МПа та 195 МПа відповідно. Криві напружень 3, 4 та 5-го варіантів мають мінімуми напружень в міді, розташовані приблизно на однаковій відстані від стику. В тугоплавкому матеріалі кожна з кривих напружень, починає вести себе по-різному.

Криві напружень 4 та 5-го варіантів (рис. 4.10) мають максимуми (47 МПа та 52,2 МПа відповідно) на відстані вже 2,5 мм від поверхні. Крива ж 3-го варіанту має максимум рівний 58 МПа на відстані 2 мм від стику міді з ніобієм.

					MP 8.132.6121м.01.06.04. ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Криві 3, 4, 5-го варіантів на поверхні тугоплавкого матеріалу мають величини напруження близькі до нуля. Крива напружень 6-го варіанту проходить у від'ємній площині, тільки в зоні стику буде максимальне значення рівне 0,22 МПа, тобто будуть присутні незначні напруження розтягу.

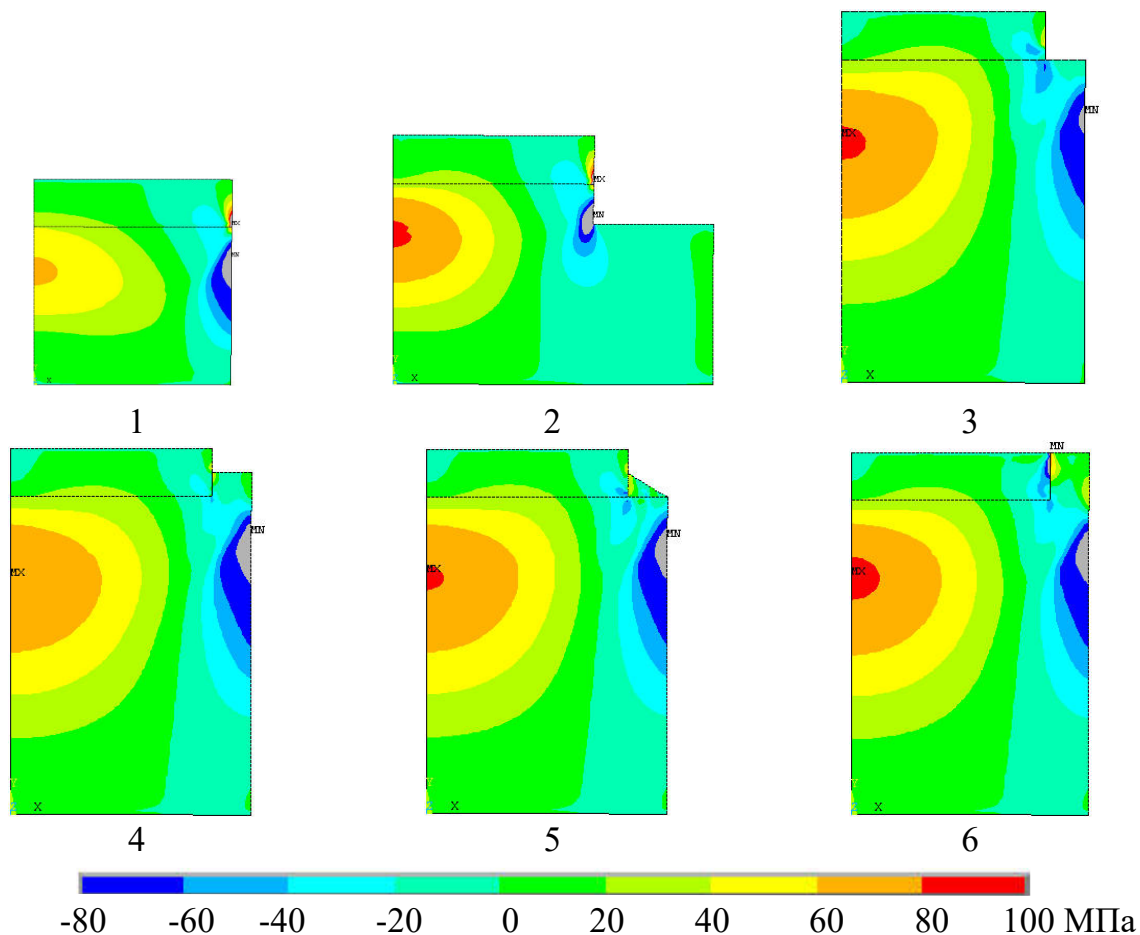
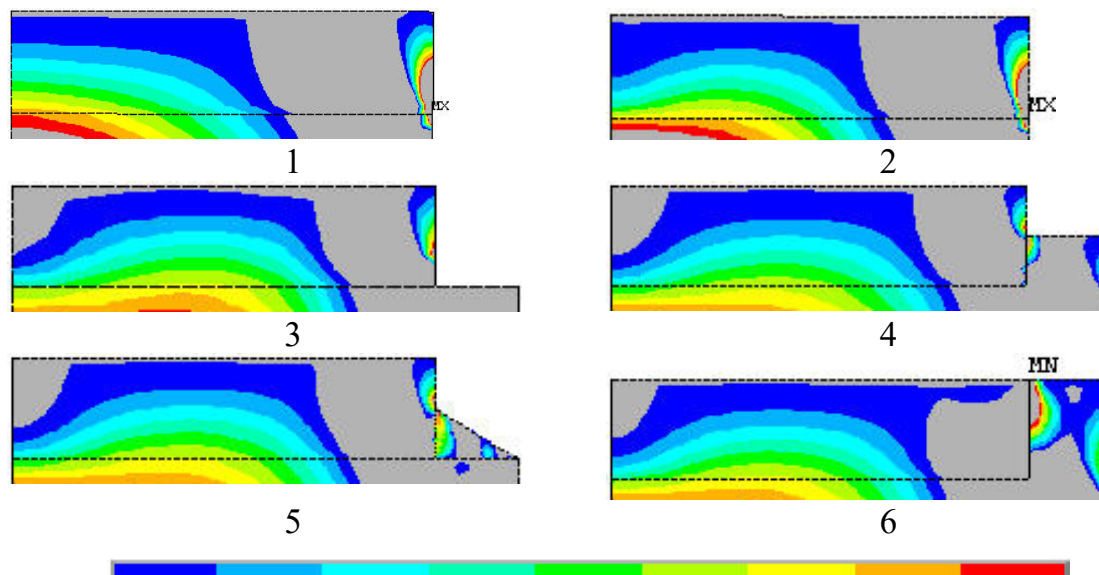


Рисунок 4.6. Поля осьових напружень σ_y у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР 8.132.6121м.01.06.04. ПЗ

Арк.
56

0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 МПа
Рисунок 4.7. Поля осьових напружень σ_y в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6

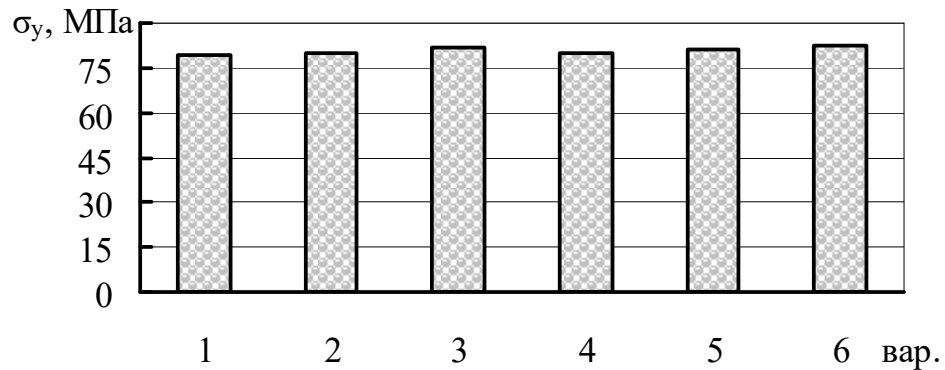


Рисунок 4.8. Рівні максимальних осьових напружень σ_y в мідному корпусі катоду при різних варіантах конструкції вузла

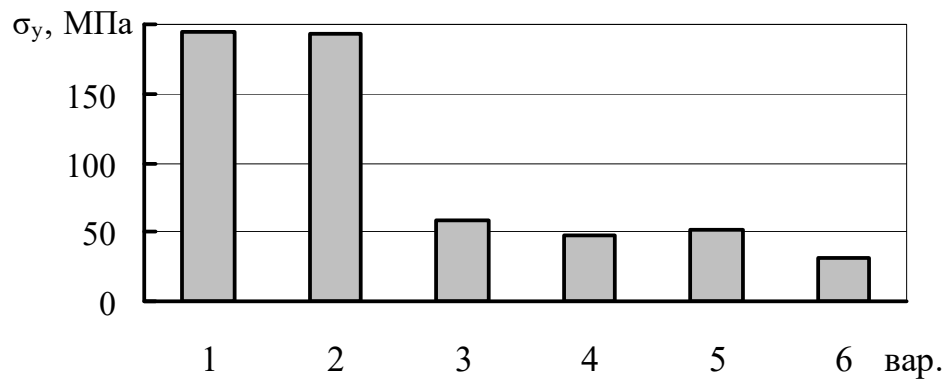


Рисунок 4.9. Рівні максимальних осьових напружень розтягу σ_y в тугоплавкому матеріалі при різних варіантах конструкції вузла

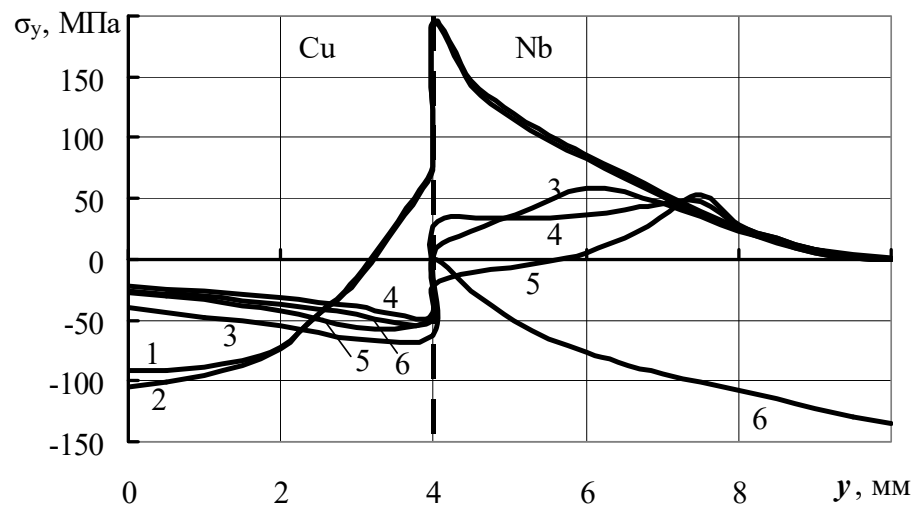


Рисунок 4.10. Епюри осьових напружень розтягу σ_y у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6 за перерізом 3-3

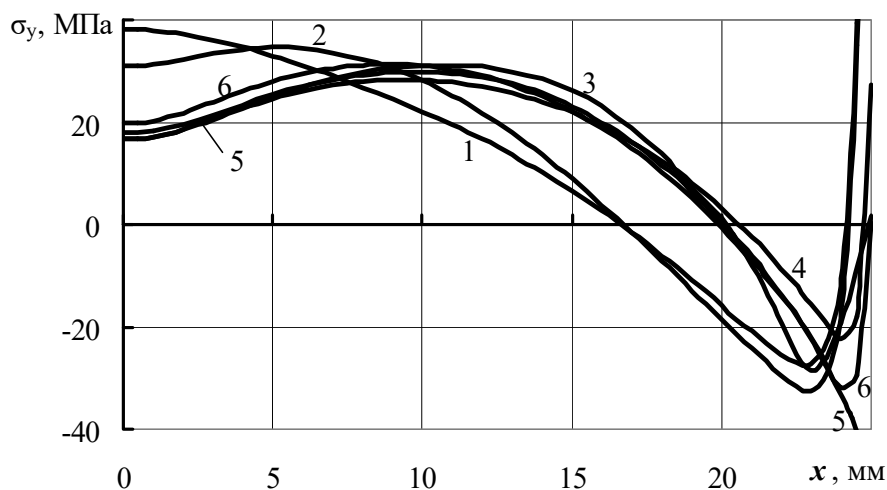


Рисунок 4.11. Епюри осьових напружень σ_y в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6 за перерізом 2-2

Криві напружень, зображені на рис. 4.11, показують розподіл осьових напружень в зоні стику в тугоплавкому матеріалі. Характер кривих схожий, вирізняється тільки 6-й варіант, який не має напружень розтягу з приближенням до бокової поверхні тугоплавкого матеріалу. Напруження кривих всіх варіантів спочатку незначно зростають, а потім по мірі віддалення від центру конструкції зменшуються, доходять до свого мінімуму, а потім знову зростають вже до максимуму, який знаходиться на боковій поверхні тугоплавкого матеріалу.

Оцінка напружено-деформованого стану розрахованих моделей за осьовими напруженнями розтягу, показала що найбільш придатною є конструкції 6 і 4-го варіантів, а гіршими – 1 і 2-го.

4.3. Дослідження конструкцій за тангенціальними напруженнями

Аналіз отриманих полів тангенціальних напружень σ_z (рис. 4.12), показав, що найбільш небезпечна точка знаходиться в центрі мідного корпусу поблизу

стику. Тангенціальні напруження в ній максимальні в усіх варіантах. А мінімальні напруження знаходяться в центрі випаровувача з тугоплавкого матеріалу на зовнішній поверхні в зоні стику.

Тангенціальні напруження розтягу σ_z (рис. 4.13) у випаровувачі в 3, 4 та 5-му варіантах відсутні. А в 1-му варіанті дорівнюють – 45,5 МПа, 2-му – 29,4 МПа, 6-му – 21,6 МПа.

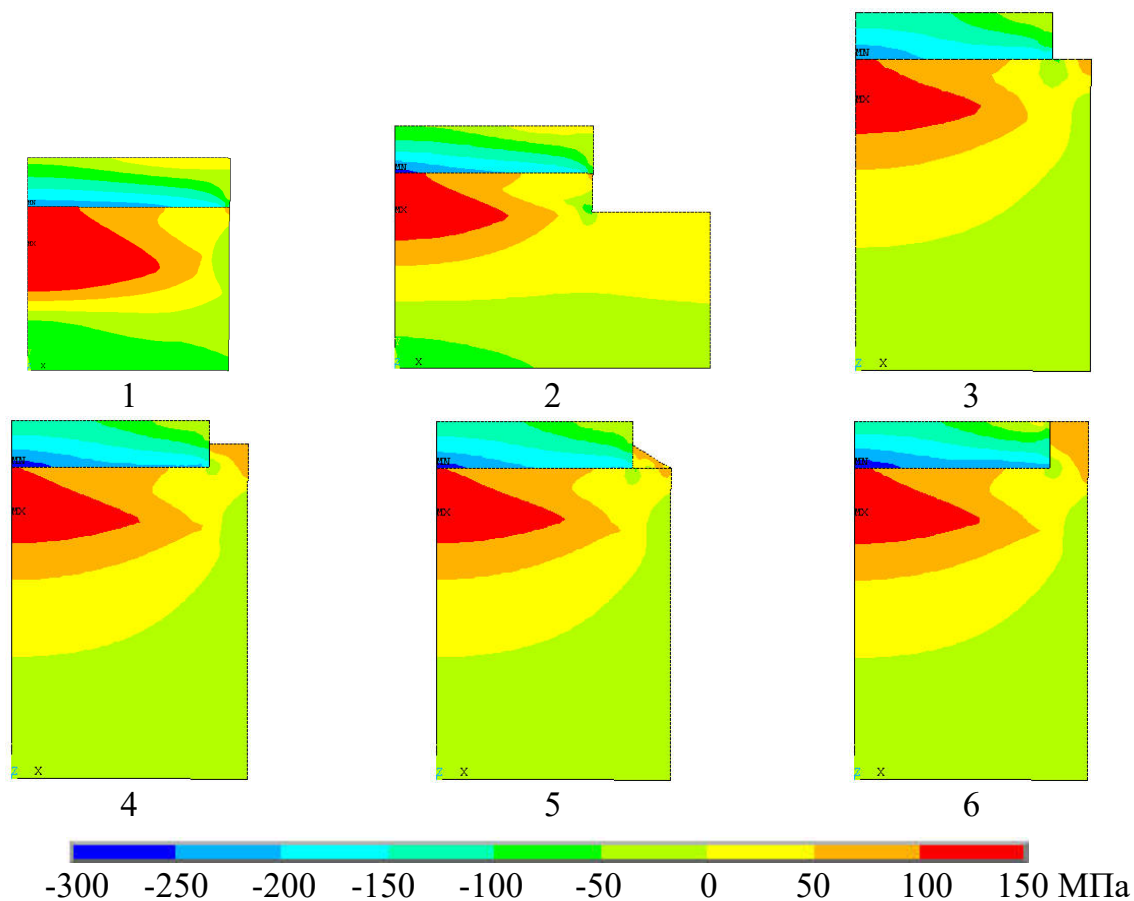
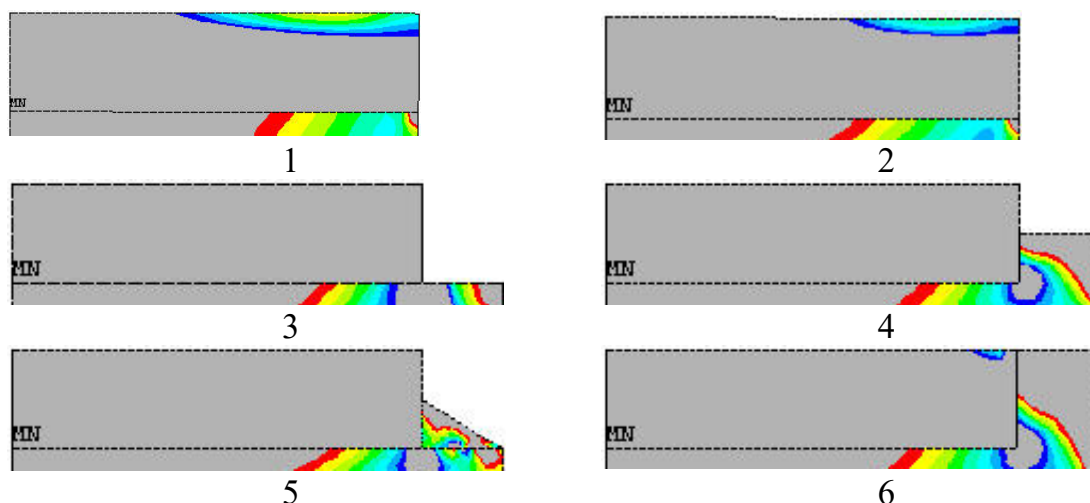


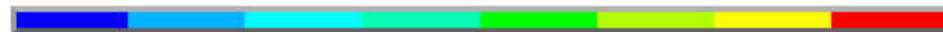
Рисунок 4.12 Поля тангенціальних напружень σ_z у варіантах конструкції 1-6



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР 8.132.6121м.01.06.04. ПЗ

Арк.
59



0 7 14 21 28 35 42 49 56 МПа

Рисунок 4.13. Поля тангенціальних напружень σ_z в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6

Як видно з рис. 4.14 найбільші максимальні тангенціальні напруження σ_z виникають у 2 (151 МПа) і 6-му (147 МПа) варіантах. А найменші максимальні напруження – у 1 (134 МПа) і 3-му (143 МПа) варіантах. У 4 і 5 варіантах максимальні тангенціальні напруження однакові і дорівнюють 144 МПа.

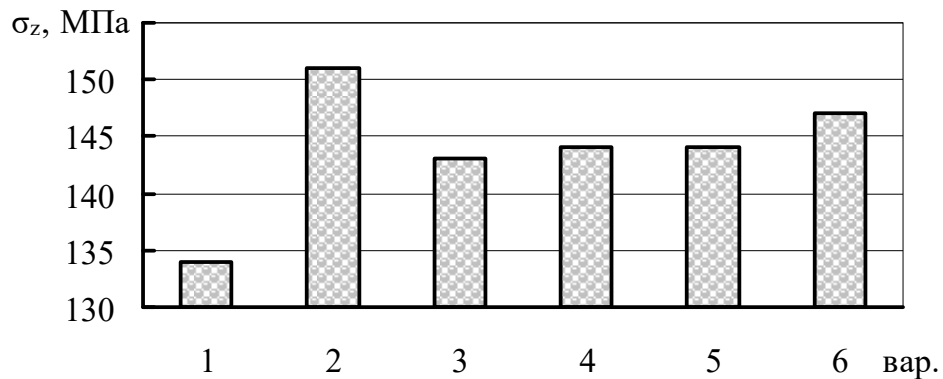


Рисунок 4.14. Рівні максимальних тангенціальних напружень σ_z в мідному корпусі при різних варіантах конструкції вузла

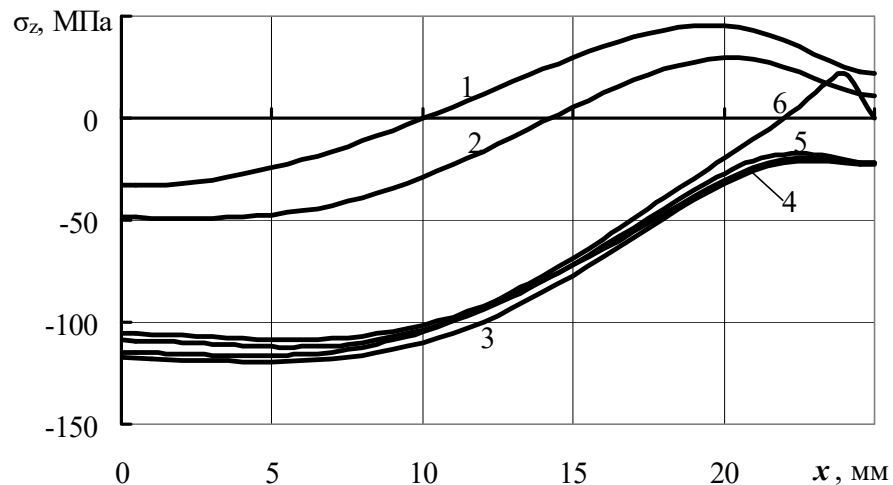


Рисунок 4.15. Епюри тангенціальних напружень σ_z в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6 за перерізом 1-1

Характер кривих напружень всіх варіантів конструкції, зображених на

рис. 4.15 один і той самий. Крива 6-го варіанту відрізняється сходженням напруження до максимуму, який знаходиться поблизу поверхні тугоплавкого матеріалу і дорівнює 21,5 МПа. Максимуми інших варіантів мають невеликі відхилення один від одного. Для 1 та 2-го варіантів максимум знаходиться на 5 мм від зовнішньої поверхні і дорівнює 45 МПа та 30 МПа відповідно, для 3, 4 та 5-го - на відстані 3 мм від зовнішньої поверхні, вони приблизно однакові -21,1 МПа, -19 МПа, -17 МПа відповідно.

Оцінка напружено-деформованого стану розрахованих моделей за тангенціальними напруженнями розтягу, показала що придатними є всі конструкції, зокрема конструкцій 1 та 2-го варіантів.

4.4 Дослідження конструкцій за дотичними напруженнями

Аналіз отриманих полів дотичних напружень τ_{xy} (рис. 4.16) показав, що найбільш небезпечна точка знаходиться на поверхні тугоплавкого матеріалу або мідного корпусу в зоні стику (варіанти 1, 2, 3) чи біля з'єднання з крайкою мідного корпусу (варіанти 4, 5, 6). Максимальні радіальні напруження в усіх варіантах конструкції знаходяться у випаровувачі.

В тугоплавкому матеріалі дотичні напруження (рис. 4.17) сконцентровані на поверхні випаровувача в зоні стику поблизу бокової поверхні (варіанти 1, 2, 3) чи біля його з'єднання з крайкою мідного корпусу (варіанти 4, 5, 6).

Як видно з рис. 4.18 найбільші максимальні напруження τ_{xy} в мідному корпусі виникають у 3 (78,1 МПа) і 5-му (77,8 МПа) варіантах. А найменші максимальні напруження – у 1 (56,9 МПа) і 2-му (56,3 МПа) варіантах. У 4 і 6-му варіантах максимальні дотичні напруження близькі і відповідно дорівнюють 66,1 МПа і 64,4 МПа.

Найбільші максимальні напруження в тугоплавкому матеріалі на рис. 4.19 в 5-му варіанті і дорівнюють 166 МПа, а найменші в 1 та 2-му варіантах – 48 МПа та 52 МПа відповідно. Рівні максимальних напружень в тугоплавкому ма-

					MP 8.132.6121м.01.06.04. ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

теріалі в 3, 4 та 6-му варіантах дорівнюють 148 МПа, 106 МПа та 105 МПа відповідно.

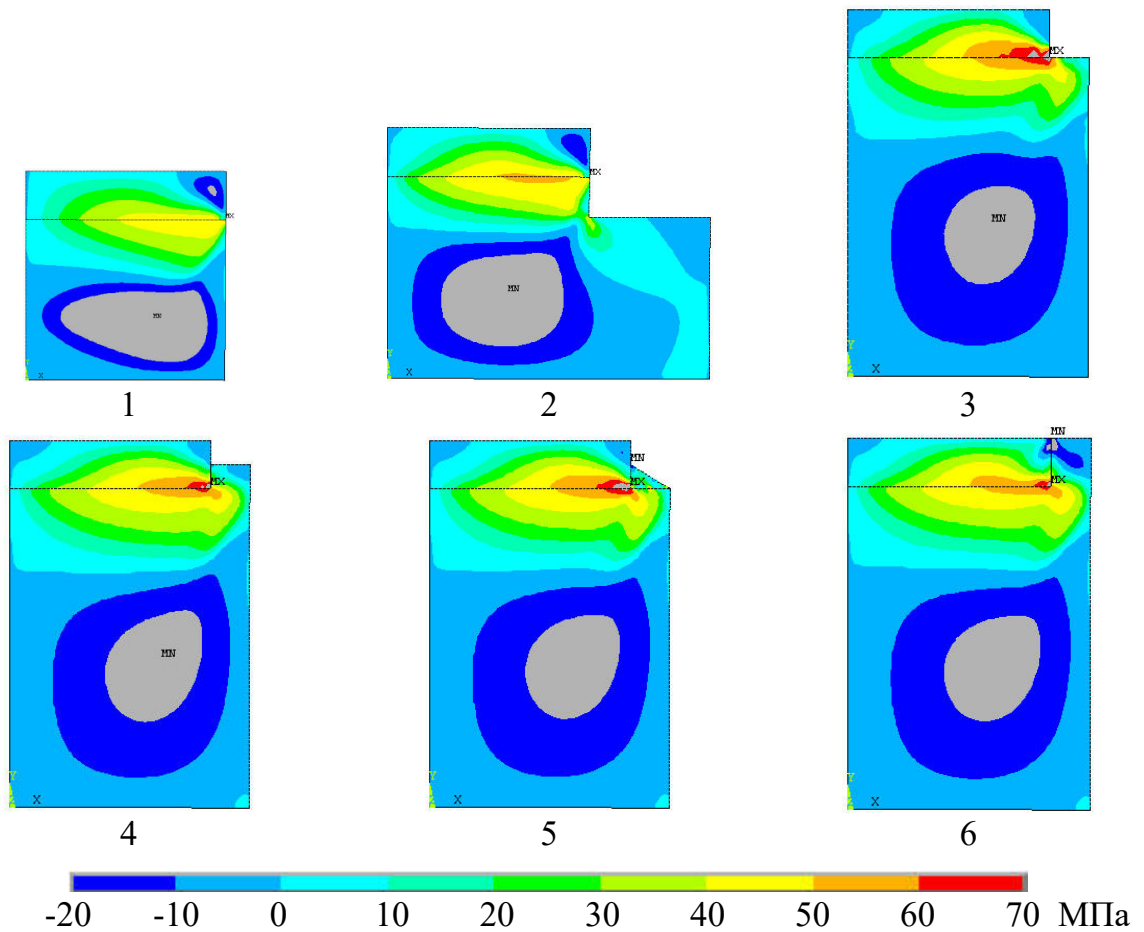


Рисунок 4.16. Поля дотичних напружень τ_{xy} у варіантах конструкції 1-6

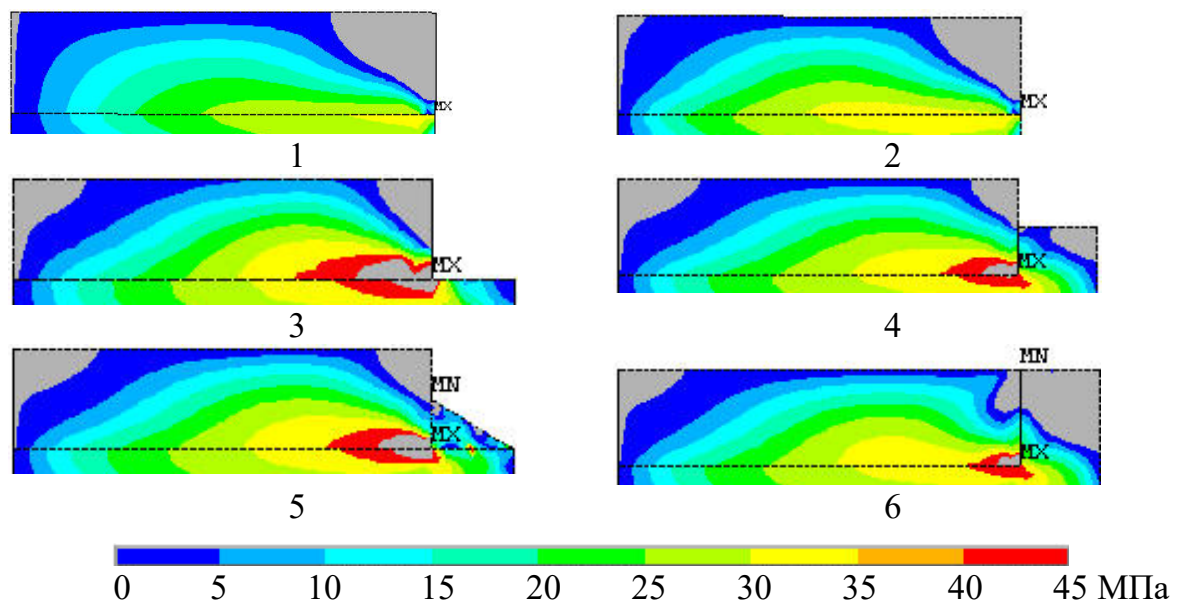


Рисунок 4.17. Поля дотичних напружень τ_{xy} в ніобії у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6

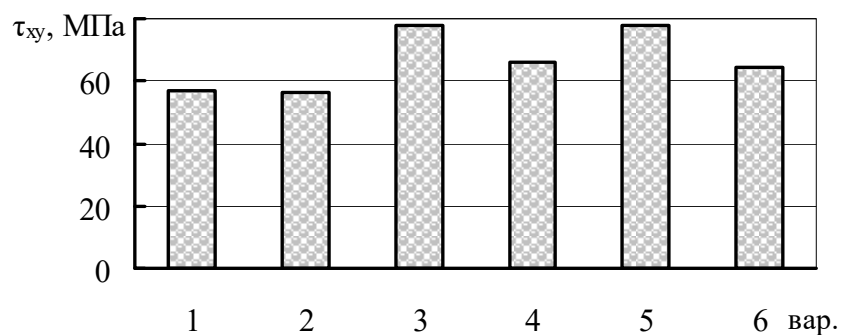


Рисунок 4.18. Рівні максимальних дотичних напружень τ_{xy} в мідному корпусі катода при різних варіантах конструкції вузла

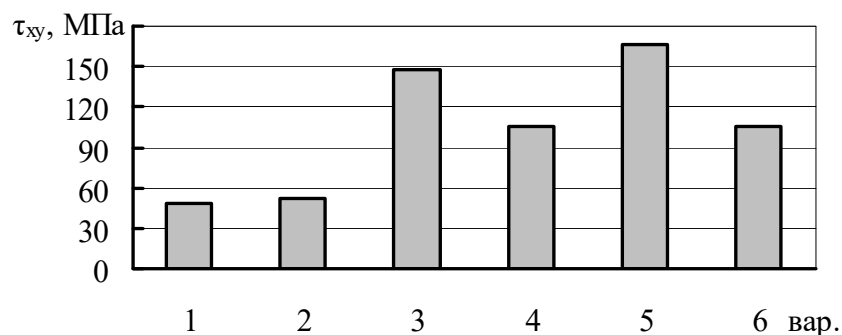


Рисунок 4.19. Рівні максимальних дотичних напружень τ_{xy} в тугоплавкому матеріалі при різних варіантах конструкції вузла

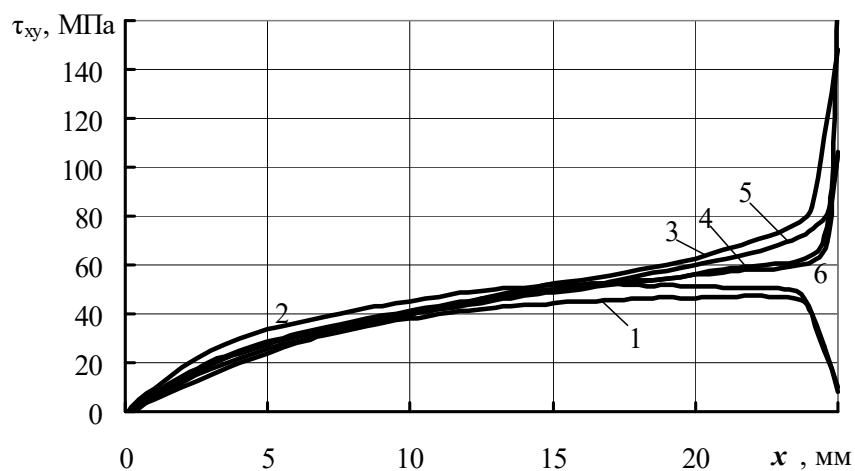


Рисунок 4.20. Епюри дотичних напружень τ_{xy} в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6 за перерізом 2-2

На рис. 4.20 криві напружень майже однакові, тільки при наближені до зовнішньої поверхні з'являються відмінності. У 1 та 2-му варіантах максимуми

кривих напружень знаходяться на відстані 7 мм від поверхні і дорівнюють 48 МПа та 52 МПа відповідно, потім напруження різко зменшуються до -2,45 МПа та -5,21 МПа і знову зростають до 9,74 МПа та 7,98 МПа. Для всіх інших варіантів, 3, 4, 5, 6-го, максимум знаходиться на самій поверхні випаровувача і дорівнює 148 МПа, 106 МПа, 166 МПа та 105 МПа відповідно.

Оцінка напружено-деформованого стану розрахованих моделей за дотичними напруженнями, показала що найбільш придатними є конструкції 1 та 2-го варіантів, а гіршою – 5-го.

4.5 Дослідження конструкцій за еквівалентними напруженнями

Для всіх варіантів (рис. 4.21) на полях еквівалентних напружень секв небезпечними є точки, що знаходяться на зовнішній поверхні тугоплавкого матеріалу поблизу стику: одна розташована в центрі, друга - біля з'єднання з крайкою основної частини, в якій напруження максимальні. Тільки в 6-му варіанті максимальне напруження знаходиться в центрі.

Концентрація еквівалентних напружень у випаровувачі (рис. 4.22) аналогічна концентрації напружень у всієї конструкції катоду у всіх варіантах (рис. 4.21).

Як видно з рис. 4.23 найбільші максимальні еквівалентні напруження в мідному корпусі секв виникають у 5 (138 МПа) і 3-му (140 МПа) варіантах. А найменші максимальні напруження – у 1 (101 МПа) і 2-му (103 МПа) варіантах. У 4 і 6 варіантах максимальні еквівалентні напруження близькі і відповідно дорівнюють 119 МПа і 117 МПа.

Найбільші максимальні напруження в тугоплавкому матеріалі на рис. 4.24 виникають в 5-му варіанті – 342 МПа, а найменші в 6 і 4-му – 312 МПа та 318 МПа відповідно. У 1, 2 і 3-му варіантах максимальні еквівалентні напруження в тугоплавкому матеріалі близькі і відповідно дорівнюють 329 МПа, 327 МПа і 339 МПа відповідно.

					МР 8.132.6121м.01.06.04. ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

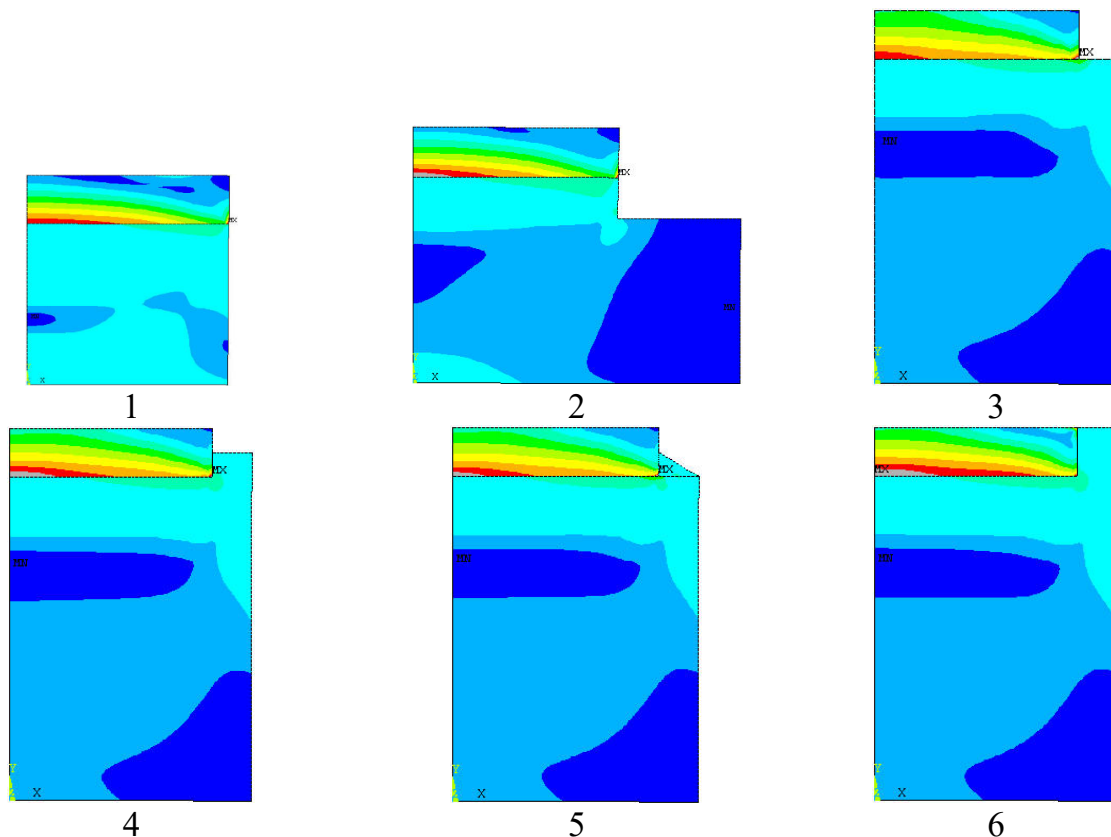


Рисунок 4.21. Поля еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ у варіантах конструкції 1-6

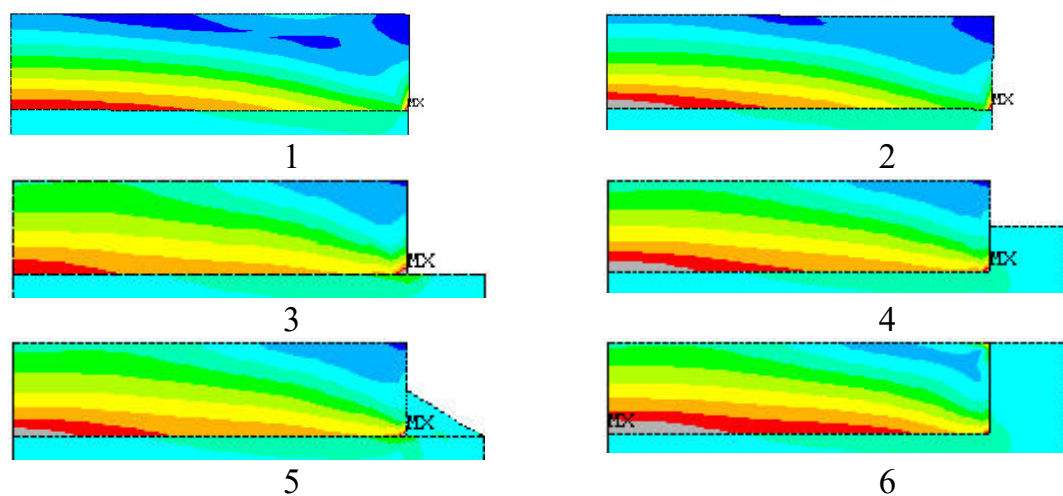


Рисунок 4.22. Поля еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1- 6

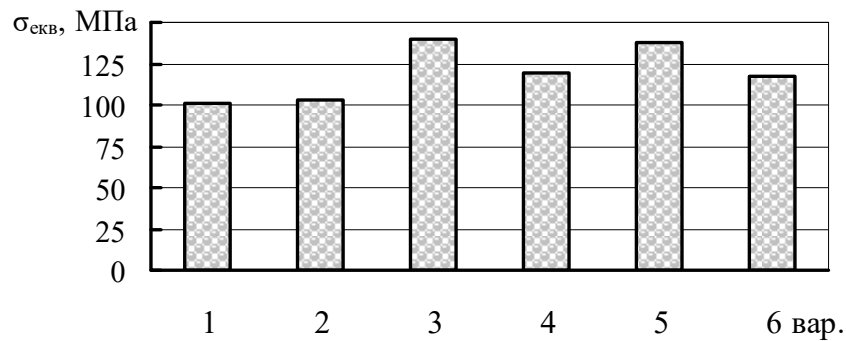


Рисунок 4.23. Рівні максимальних еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ в мідному корпусі при різних варіантах конструкції вузла

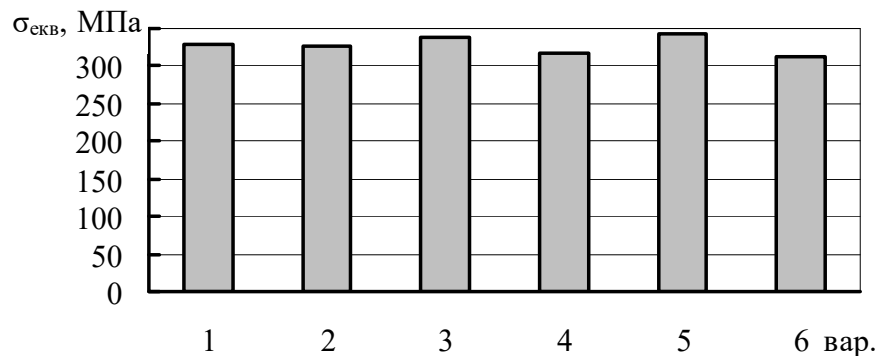


Рисунок 4.24. Рівні максимальних еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ в тугоплавкому матеріалі при різних варіантах конструкції вузла

На рис. 4.25 криві майже однакові, тільки при наближенні до зовнішньої поверхні та на початку з'являються відмінності. Криві 1 та 2-го варіантів починаються з 264 МПа та 300 МПа, сходять до мінімумів 141 МПа та 138 МПа і знову зростають до максимумів, які знаходяться на стику і дорівнюють 329 МПа та 327 МПа відповідно. Для 3, 4, 5-го варіантів, максимум знаходиться на самій поверхні і дорівнює 339 МПа, 318 МПа та 342 МПа відповідно. Для кривої 6-го варіанту максимум знаходиться на початку і дорівнює 312 МПа, а на поверхні тугоплавкого матеріалу напруження дорівнюють 288 МПа.

Криві еквівалентних напружень за переріз 2'-2' в мідному корпусі мають схожий характер: зростання напружень по мірі наближення до бокової поверхні, а потім незначне зменшення. Тільки криві напружень 1 та 2-го варіантів перед наближенням до бокової поверхні не значно зростають.

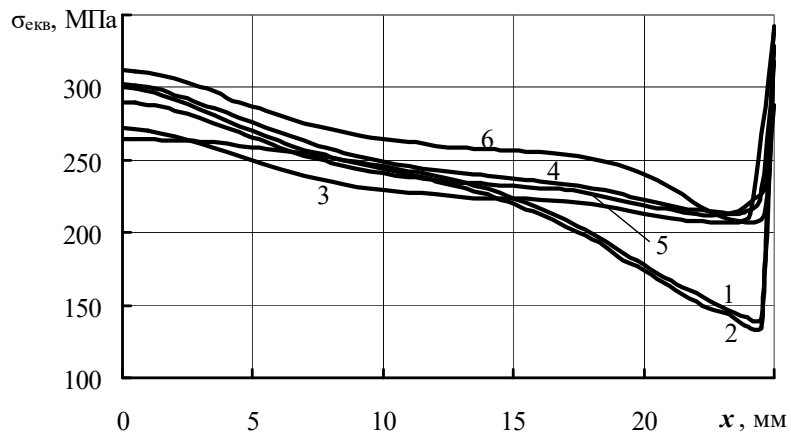


Рисунок 4.25. Епюри еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ в тугоплавкому матеріалі у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6 за перерізом 2-2

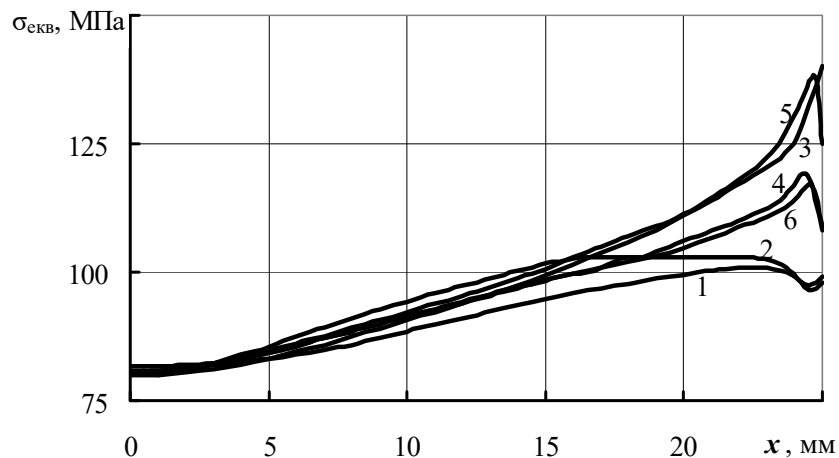


Рисунок 4.26. Епюри еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ в міді в зоні стику у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6 за перерізом 2'-2'

Оцінка напружено-деформованого стану розрахованих моделей за еквівалентними напруженнями, показала що найбільш придатними є конструкції 3 та 5-го варіантів, а гіршою - 1-го.

4.6 Дослідження конструкцій за пластичними деформаціями

Аналіз отриманих полів пластичних деформацій ϵ (рис. 4.27) показав, що найбільша деформація відбувається на поверхні мідної основи поблизу краю з'єднання. Пластичні деформації в ній максимальні в усіх варіантах.

Як видно з рис. 4.28 найбільші максимальні пластичні деформації ϵ виникають у 5 (5,23%) і 3-му (4,94%) варіантах. Найменші максимальні деформації – у 1 (2,09%) і 2 (2,26%) варіантах. У 4 і 6 варіантах максимальні пластичні деформації близькі і відповідно дорівнюють 3,28% і 3,15%.

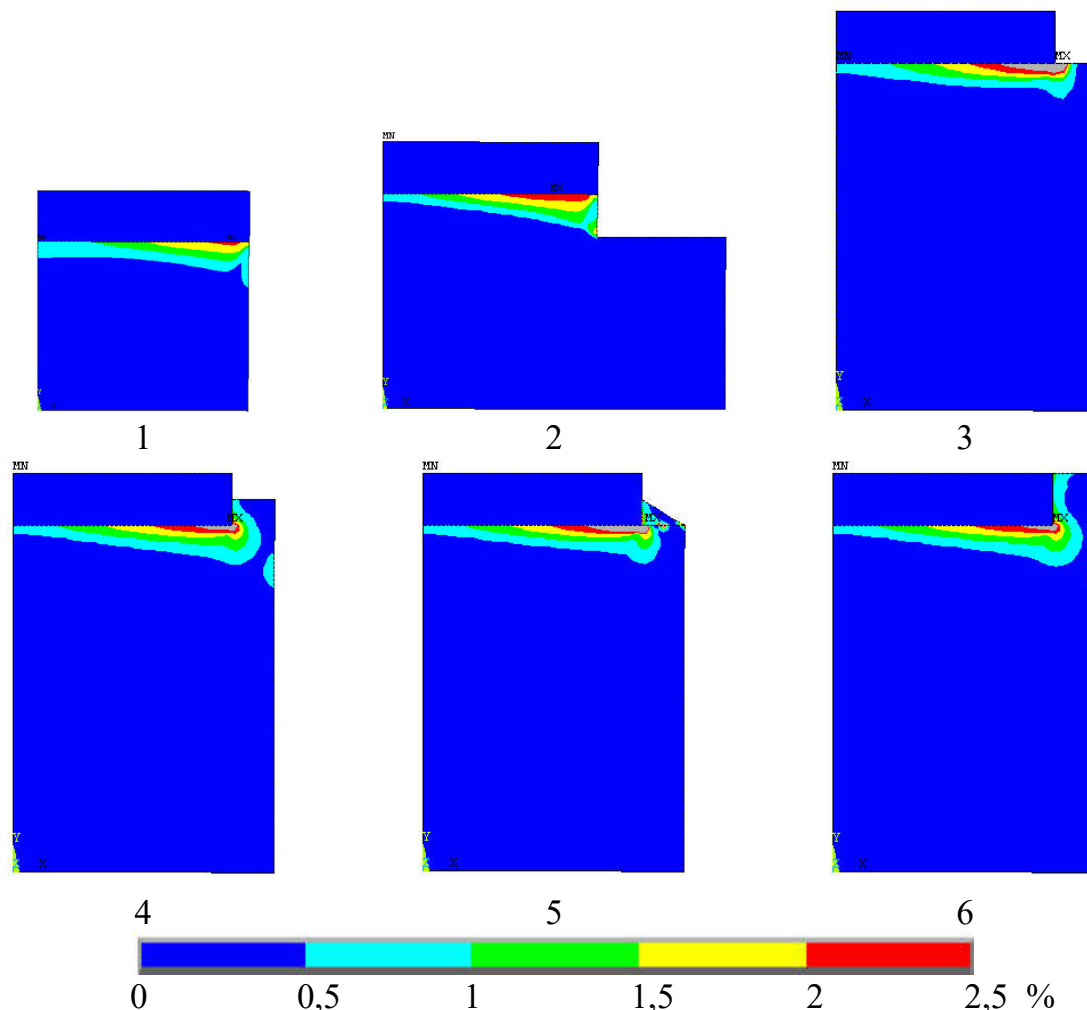


Рисунок 4.27. Поля пластичних деформацій ϵ у варіантах конструкції 1-6

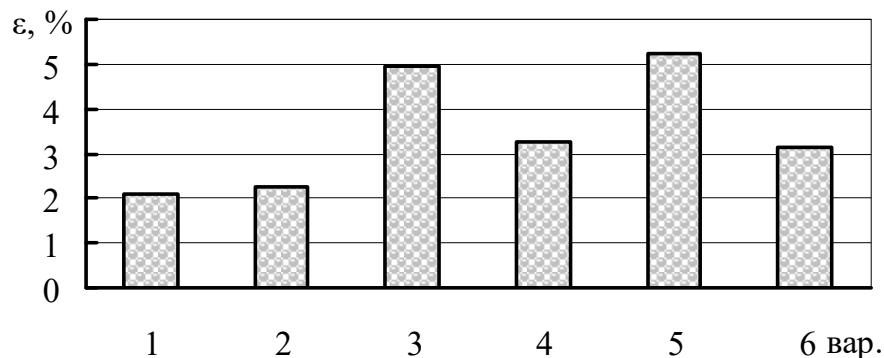


Рисунок 4.28. Рівні максимальних пластичних деформацій ϵ в катоді при різних варіантах конструкції вузла

Характер кривих пластичної деформації майже однаковий, з приближенням до поверхні з'являються відмінності. Криві деформацій 1 та 2-го варіантів мають максимум на відстані 5 мм від поверхні і дорівнює 2,09 %, та 2,26 % відповідно, а потім спадають і знову не значно зростають. Максимуми кривих деформацій 3, 4, 5 та 6-го варіантів розташовані близько біля поверхні і відповідно дорівнюють: 4,94 %, 3,27 %, 4,6 % та 3,14 %.

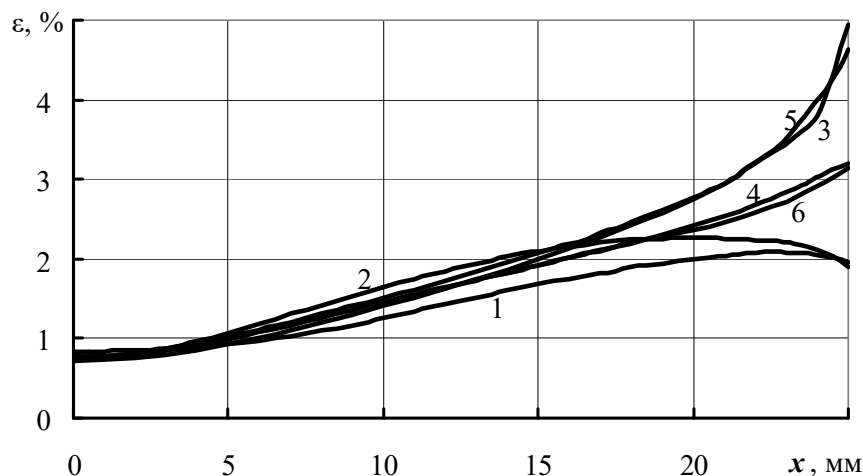


Рисунок 4.29. Епюри пластичних деформацій ϵ на поверхні міді в стикі з тугоплавким матеріалом у варіантах конструкції 1, 2, 3, 4, 5, 6 за перерізом 2-2

Оцінка пластичної деформації показала, що найбільше будуть релаксуватись напруження конструкцій за рахунок деформацій пластичності 5 та 3-го варіантів, а менше – 1 та 2-го.

4.7 Порівняння результатів досліджень

Для зручності порівняння варіантів і вибору оптимальної конструкції приведено рівні максимальних напружень у випаровувачі рис. 4.30.

Аналіз рівнів максимальних напружень в тугоплавкому матеріалі показав, що:

- за радіальними напруженнями розтягу кращою є конструкція 4-го варіанту, а гіршою в свою чергу є 6-го;
- за осьовими напруженнями розтягу кращими є конструкції 6 та 4-го варіантів, а гіршими – 1 та 2-го;

- за тангенціальними напруженнями конструкції 3, 4 та 5-го варіантів є придатними, оскільки напруження розтягу в них відсутні, гіршою - 1;
- за дотичними напруженнями кращими є конструкції 1 та 2-го варіантів, гіршою - 5-го.

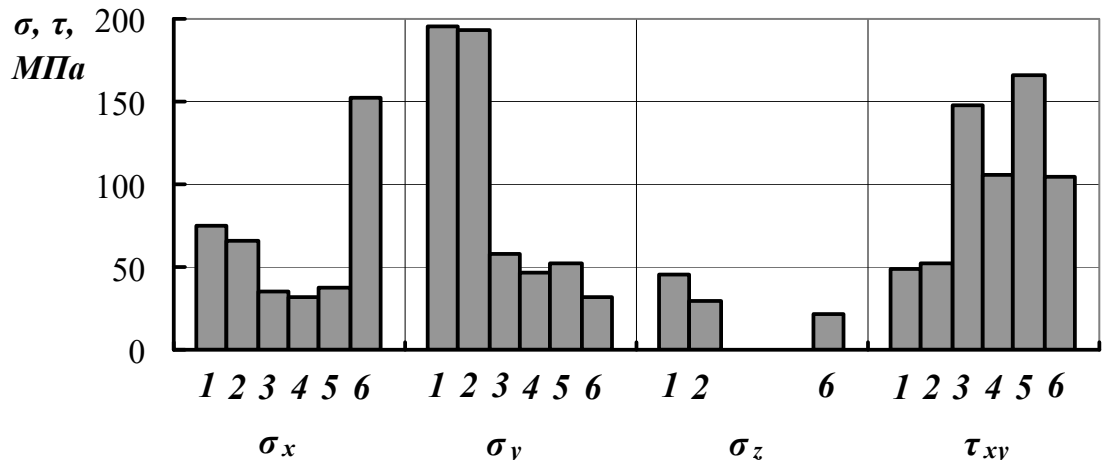


Рисунок 4.30. Рівні максимальних напружень в тугоплавкому матеріалі при різних варіантах конструкції вузла

За еквівалентними напруженнями в мідному корпусі, як додатковим критерієм оцінки оптимальності, кращими є 3 і 5 варіанти, гіршим – 1-й.

З точки зору збереження цілісності вузла можна вважати найбільш придатним 4 варіант конструкції, який забезпечує мінімальний рівень залишкових напружень в тугоплавкому матеріалі.

Беручи до уваги додаткові критерії, а також виходячи з розрахунку пластичної задачі, яка дає більш повну картину максимальних напружень розтягу і яка враховує пластичну деформацію міді, яка розвантажує тугоплавкий матеріал, тобто зменшує напруження у випаровувачі, оптимальним варіантом конструкції обрано 4 варіант.

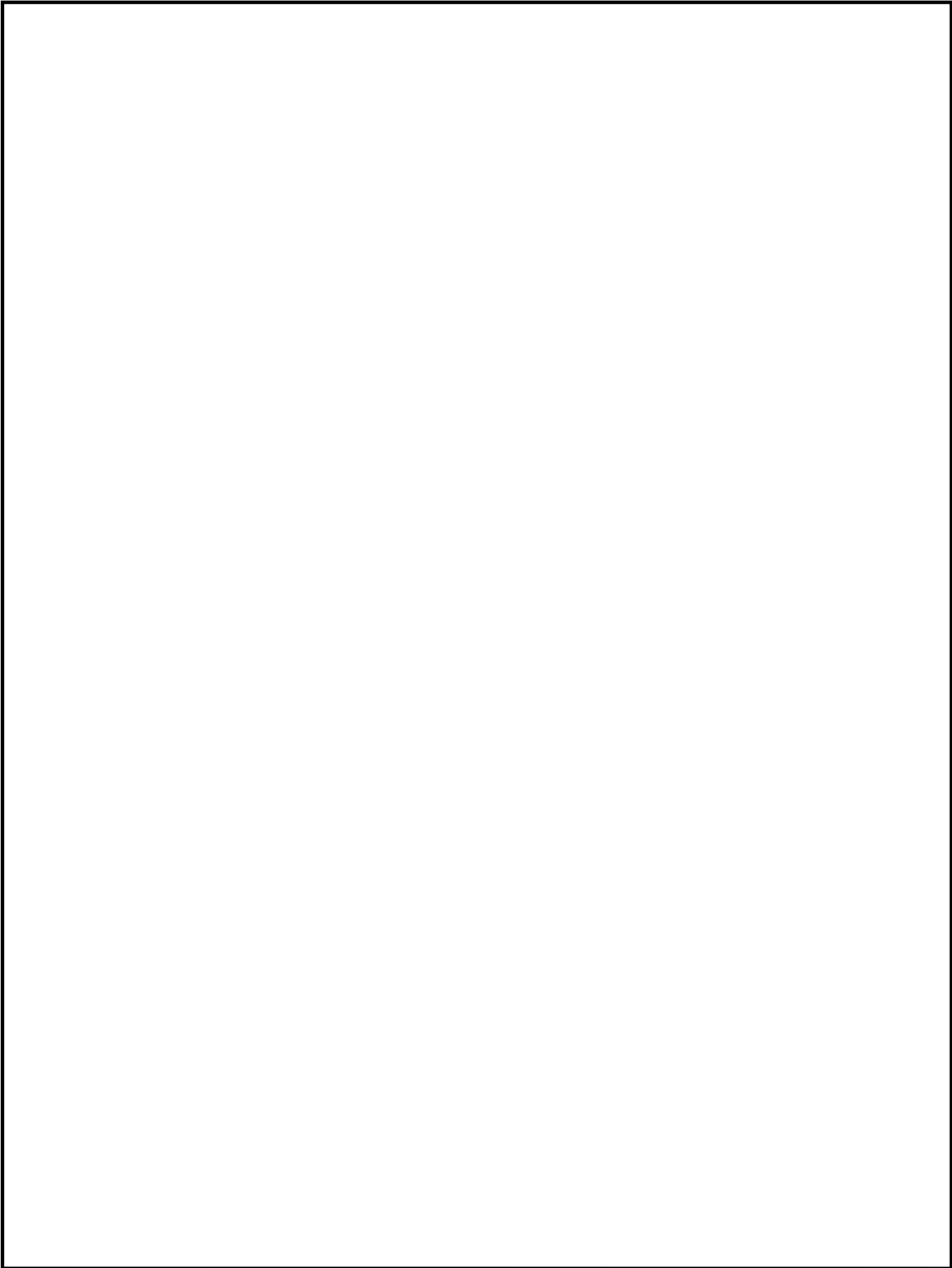
Висновки

1. Досліджено напружено-деформований стан при з'єднанні міді з ніобієм з врахуванням миттєвої пластичності.
2. Встановлено що, пластичність зменшує рівні напружень в катоді. А саме,

чим більше пластична деформація, тим більша релаксація напружень.

3. Визначено, що найбільш придатними конструктивними варіантами з точки зору збереження цілісності вузла катоду для іонно-плазмового напилення є варіант 4, який забезпечує мінімальний рівень максимальних напружень в тугоплавкому матеріалі при дослідженні напружено-деформованого стану як в умовах пружності, так і з врахуванням миттєвої пластичності.

					MP 8.132.6121м.01.06.04. ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					МР 8.131.6121м.01.06.05. ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження напружено-деформованого стану при з'єднанні міді з тугоплавким матеріалом з врахуванням деформації повзучості при охолодженні з тиском та витримкою	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив	Барабаш М.С.						72	
Перевірів	Матвієнко М.В.							
Рецензент						ХННІ НУК		
Н. Контр.								
Зав. каф.								

5. Дослідження напружено-деформованого стану при з'єднанні міді з тугоплавким матеріалом з врахуванням деформації повзучості при охолодженні з тиском та витримкою

Закони і рівняння теорії пластичності дозволяють описувати напружений і деформований стан тіла, навантаженого за межами пружності, в припущенні, що при заданих температурі і навантаженні напружений і деформований стани з часом залишаються постійними. Насправді, напруження і деформації, що виникають в деталі в результаті початкового навантаження, з часом змінюються.

Під дією постійних навантажень, особливо при підвищених і високих температурах, матеріали з часом відчують зростання деформацій. Безперервне зростання деформацій з часом при постійних напруженнях називається повзучістю матеріалу.

Процес повзучості можна розділити на три стадії (рис. 5.1). На першій стадії (ділянка АВ) швидкість деформації повзучості поступово зменшується ($\dot{\epsilon}_c$ зменшується). На другій стадії (ділянка ВС) деформація повзучості протікає з постійною мінімальною швидкістю ($(\dot{\epsilon}_c)_{\min} = \text{const}$). А на третій стадії (ділянка CD) швидкість деформації повзучості швидко наростає і процес закінчується або «крихким» зламом, або «в'язким» руйнуванням. Криві повзучості для даного матеріалу при даній температурі ($T = \text{const}$) залежать від напруження (рис. 5.2, а), а при даному напруженні ($\sigma = \text{const}$) – від температури (рис. 5.2, б).

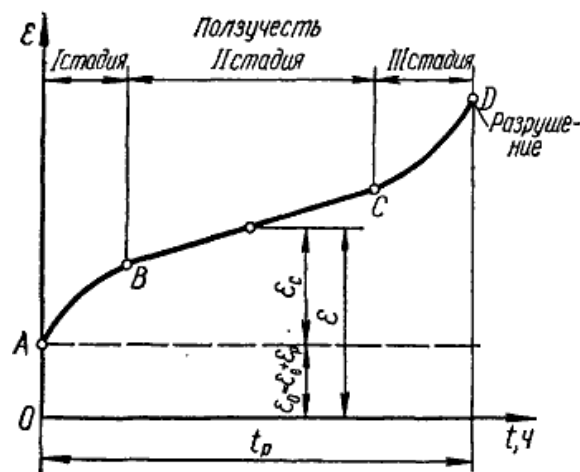


Рисунок 5.1. Стадії процесу повзучості

При розрахунках елементів конструкцій особливий інтерес представляють перша і друга стадії повзучості, оскільки третя стадія передуює руйнуванню матеріалу. Тому необхідно знати залежності між напруженням, деформацією, температурою і часом в основному на першій і другій стадіях повзучості.

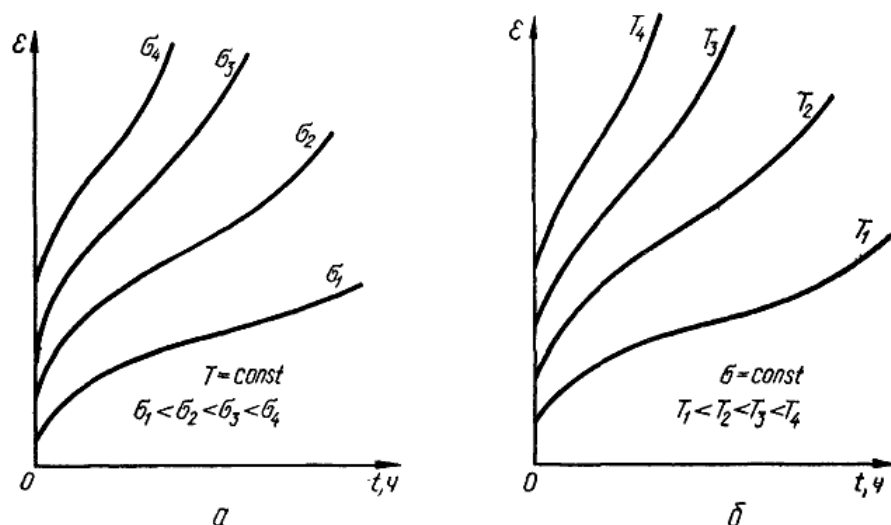


Рисунок 5.2. Криві повзучості

Програмний комплекс ANSYS дозволяє використовувати цілий ряд рівнянь, що описують швидкість деформації повзучості.

Для розрахунку швидкості деформації повзучості використано рівняння Generalized Garofalo:

$$\dot{\epsilon}_{cr} = c_1 [\sinh(c_2 \sigma)]^{c_3} \cdot e^{-c_4/T}, \quad (5.1)$$

де T – температура, К; c_1, c_2, c_3, c_4 – коефіцієнти, які приведені в таблиці 5.1.; σ – еквівалентне напруження, Па.

Таблиця 5.1. коефіцієнти повзучості

T, К	C ₁	C ₂	C ₃
473	9,81e-6	6,7e-9	3,93
673	6,8e-6	1,51e-8	3,57
723	7,8e-6	2e-8	3,36
773	6,1e-6	2,79e-8	3,39
823	4,2e-6	3,26e-8	3,38
903	1,3e-6	5,71e-8	2,66
973	9e-7	9,35e-8	2,26

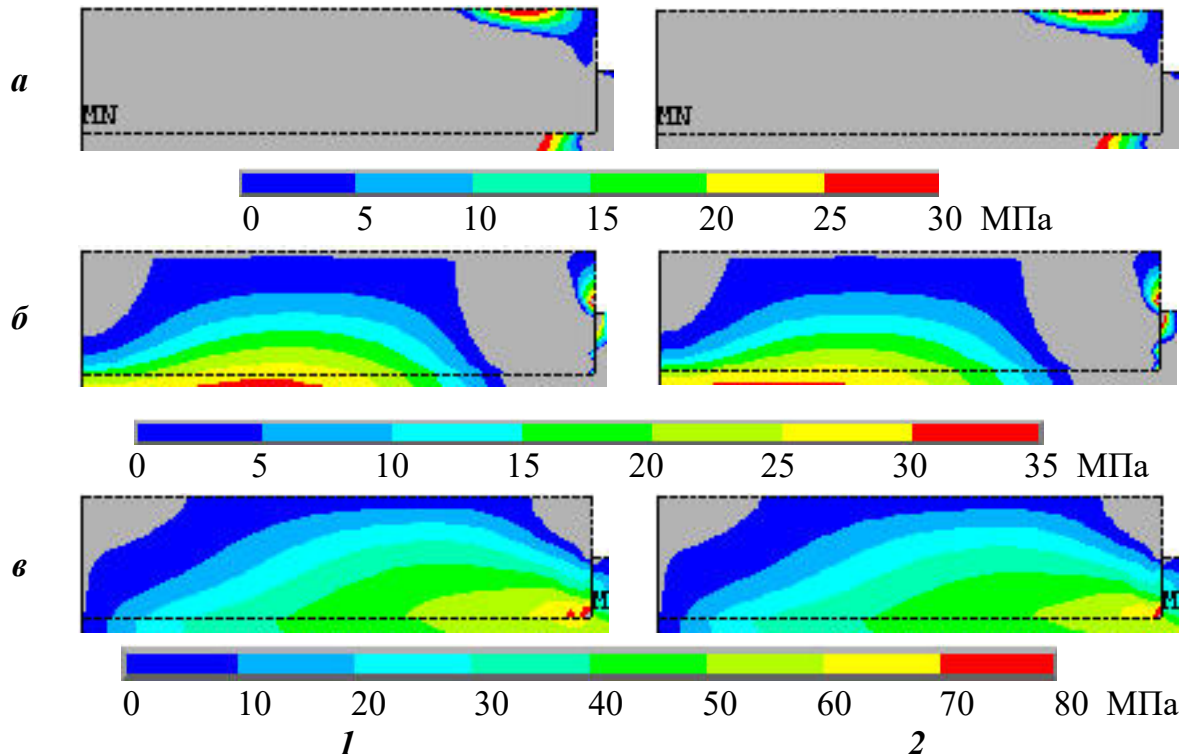
Рівняння Generalized Garofalo задовольняє нашим вимогам оскільки, може бути використане і при достатньо низьких, і при достатньо високих температурах.

5.1. Дослідження конструкції з врахуванням деформації повзучості при миттєвому охолодженні

Для уточнення результатів розрахунку, досліджено напружено-деформаційний стан найбільш придатного конструкційного варіанту катоду (4 на рис. 2.2) з врахування деформації повзучості міді при охолодження з 700°C до 20 °C за 680 секунд.

Теплофізичні властивості матеріалів наведено в таблиці 2.5.

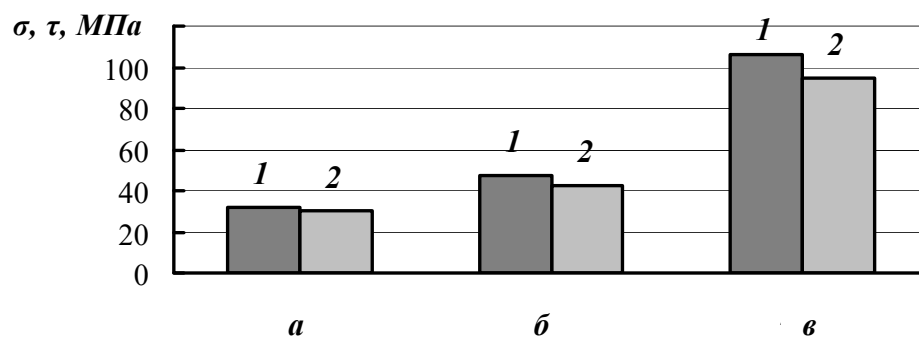
Отримано поля радіальних, осьових, тангенціальних та дотичних напружень в тугоплавкому матеріалі та порівняно з полями, які отримано після дослідження напружено-деформаційного стану (НДС) з врахуванням миттєвої пластичності, найбільш придатного варіанту катоду (4 на рис. 2.2). Як видно з рис. 5.3 суттєвих відмінностей немає.



1 - з врахуванням миттєвої пластичності, 2 – з врахування деформації повзучості; а – радіальних напружень σ_x , б – осьових напружень σ_y , в – дотичних напружень τ_{xy}

Рисунок 5.3. Поля напружень в тугоплавкому матеріалі

Значення максимальних напружень суттєво не відрізняються. Значення максимальних напружень отримані після дослідження НДС з врахуванням повзучості та охолодженням за 680 секунд дещо зменшились відносно тих, які отримані після дослідження НДС з врахуванням миттєвої пластичності. А саме, як видно з рис. 5.4 максимальні радіальні напруження σ_x зменшились з 32 МПа до 29,8 МПа; максимальні осьові напруження σ_y - з 47 МПа до 42,3 МПа; максимальні дотичні напруження τ_{xy} - з 106 МПа до 94,3 МПа. Тангенціальні напруження розтягу σ_z в тугоплавкому матеріалі відсутні.



1 - з врахуванням миттєвої пластичності, 2 - з врахування деформації повзучості; а - радіальних напружень σ_x , б - осьових напружень σ_y , в - дотичних напружень τ_{xy}

Рисунок 5.4. Рівні максимальних напружень в тугоплавкому матеріалі

Для релаксації напружень, які виникають, було застосовано ступінчате охолодження з 700°C до 20 °C з витримкою за температурами у часі (рис. 5.5) та прикладення тиску 2 МПа, 6 МПа та 10 МПа.

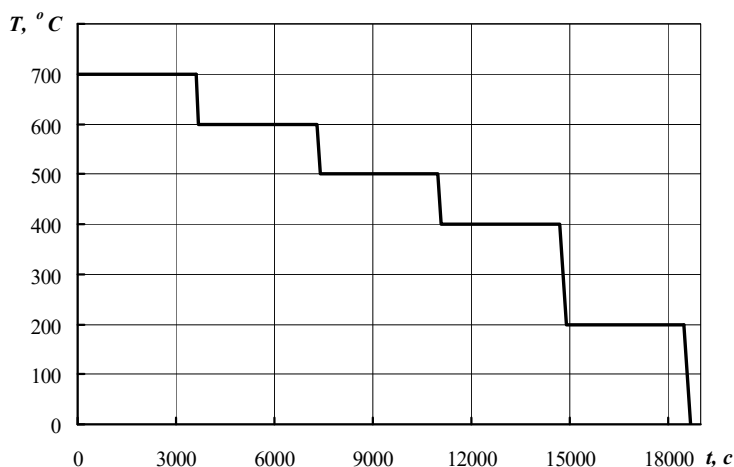
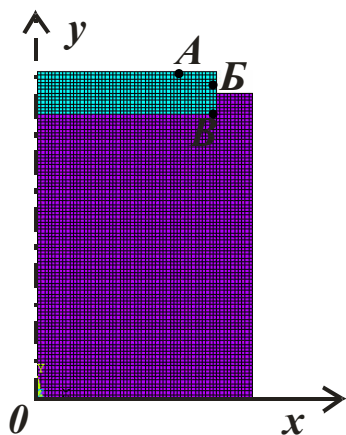


Рисунок 5.5. Термоцикл ступінчатого охолодження з витримкою при температурах за часом

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР 8.132.6121м.01.06.05. ПЗ

Арк.
76



A – радіальних напружень σ_x ; *Б* - осьових напружень σ_y ; *В* - дотичних напружень τ_{xy}

Рисунок 5.6. Точки скінчено-елементна модель, в яких виникають максимальні напруження розтягу, в тугоплавкому матеріалі:

Отримано поля максимальних напружень без навантаження та при прикладенні тиску величиною 2 МПа, 6 МПа та 10 МПа. Побудовано епюри в точках, зображених на рис. 5.6, в яких виникають максимальні напруження розтягу, від часу. Для оптимальної конструкції катоду скінчено-елементна модель буде мати вигляд, як на рис. 5.6.

5.2. Дослідження конструкції за радіальними напруженнями

Найбільші радіальні напруження σ_x знаходяться в точці А (рис. 5.7).

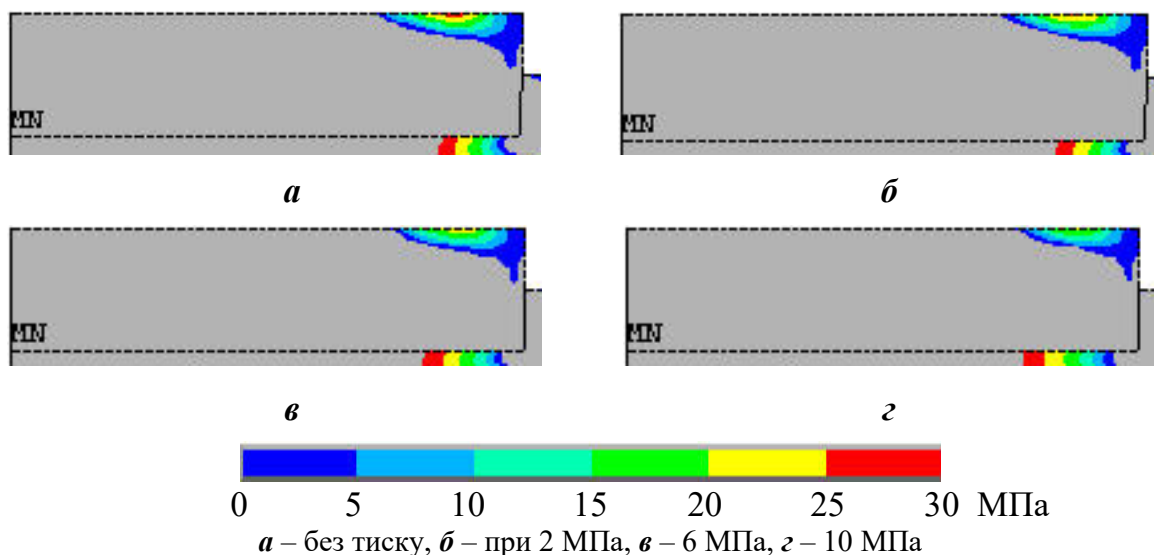


Рисунок 5.7. Поля радіальних напружень σ_x в тугоплавкому матеріалі з врахуванням деформації повзучості та з витримкою за температурами у часі

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Спостерігається зменшення максимальних радіальних напружень розтягу σ_x в тугоплавкому матеріалі при прикладенні тиску (рис. 5.8). Без прикладення тиску значення максимальних напружень дорівнюють 26,1 МПа, при прикладенні тиску 2 МПа – 25,1 МПа, при прикладенні тиску 6 МПа – 23,1 МПа, при прикладенні тиску 10 МПа – 20,5 МПа. Найменші максимальні напруження спостерігаються при ступінчатому охолодженні з витримкою за температурами у часі і прикладенні тиску 10 МПа.

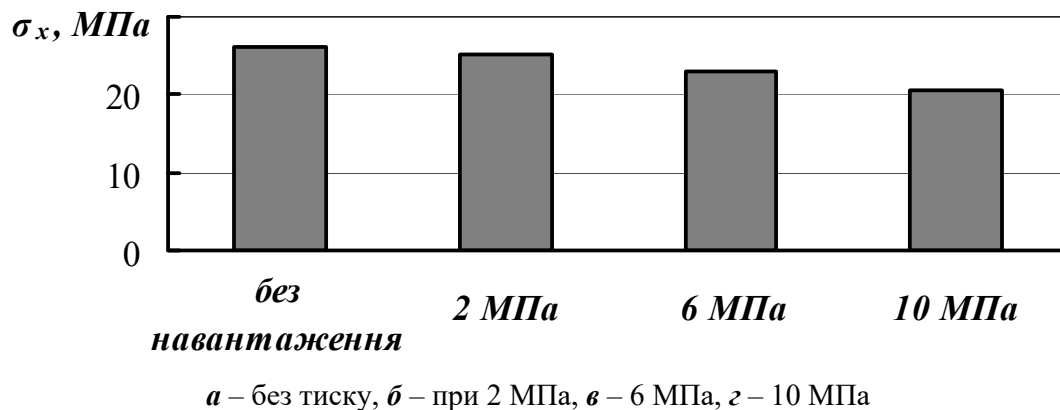


Рисунок 5.8. Рівні максимальних радіальних напружень розтягу σ_x в тугоплавкому матеріалі з врахуванням деформації повзучості та з витримкою за температурами у часі

Як видно з епюр радіальних напружень σ_x від часу (рис. 5.9) величини напружень при витримці за температурою зменшуються, а при охолодженні різко зростають до величин більших від тих, які були на початку витримки, а потім при наступній витримці зменшуються, але вже до значень менших ніж при попередній витримці.

Епюри радіальних напружень в тугоплавкому матеріалі, зображені на рис. 5.10. Видно, що характер кривих та знаходження максимуму напружень однакові. Змінюється значення максимальних та початкових напружень – при охолодженні без прикладення тиску вони є більшими. Найменші максимальні радіальні напруження розтягу в тугоплавкому матеріалі спостерігаються при прикладенні тиску 10 МПа, дорівнюють 20,5 МПа і знаходяться на відстані 3 мм від бокової поверхні катоду.

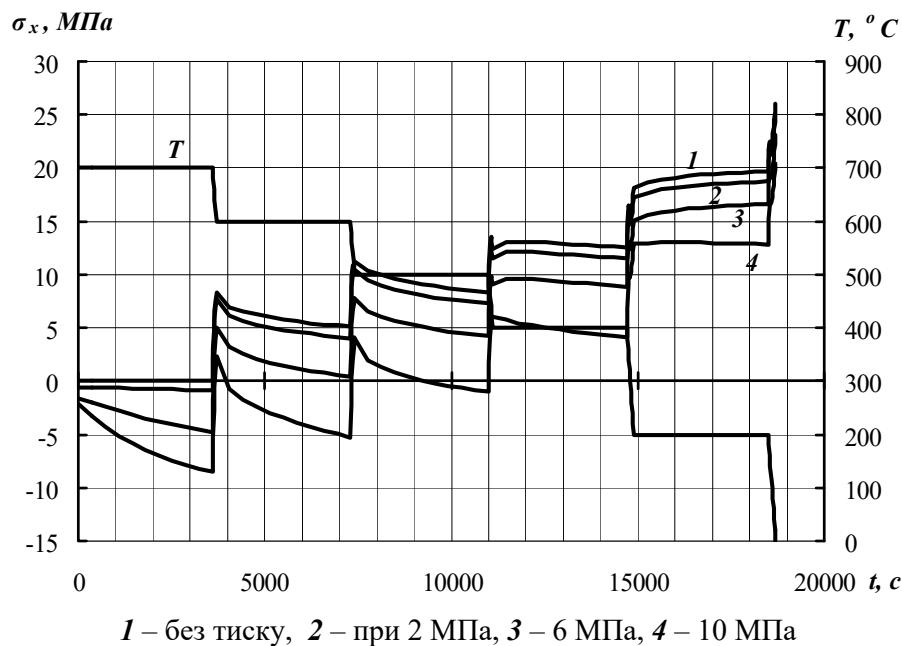


Рисунок 5.9. Епюри максимальних радіальних напружень σ_x в точці А від часу

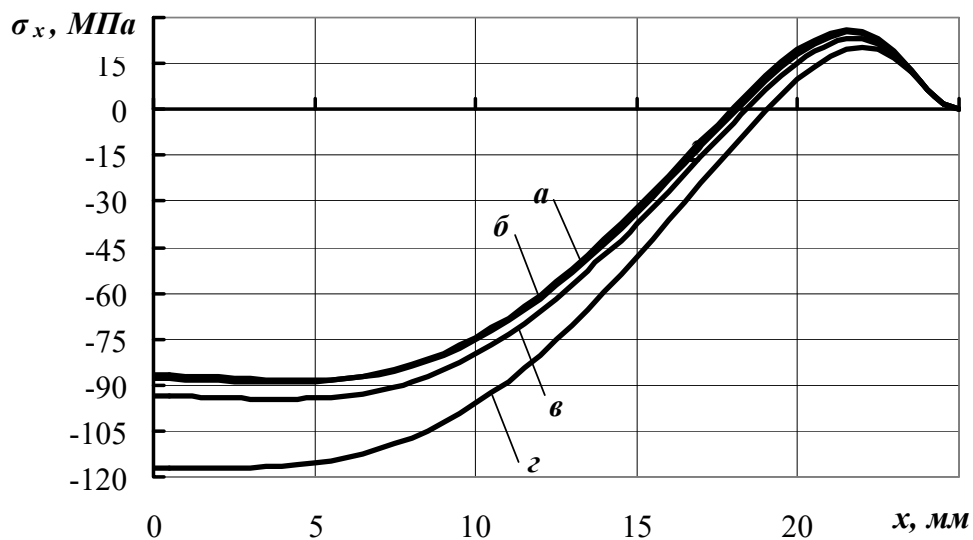


Рисунок 5.10. Епюри радіальних напружень σ_x в тугоплавкому матеріалі з врахуванням деформації повзучості та з витримкою за температурами у часі

Оцінка напружено-деформованого стану найбільш придатної моделі за радіальними напруженнями, показала що зі збільшенням прикладеного тиску напруження зменшуються, найбільший позитивний вплив надає прикладення тиску в 10 МПа.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

5.3. Дослідження конструкції за осьовими напруженнями

Концентрація осьових напружень в конструкції найбільш придатної моделі (рис. 5.11) спостерігається в точці Б.

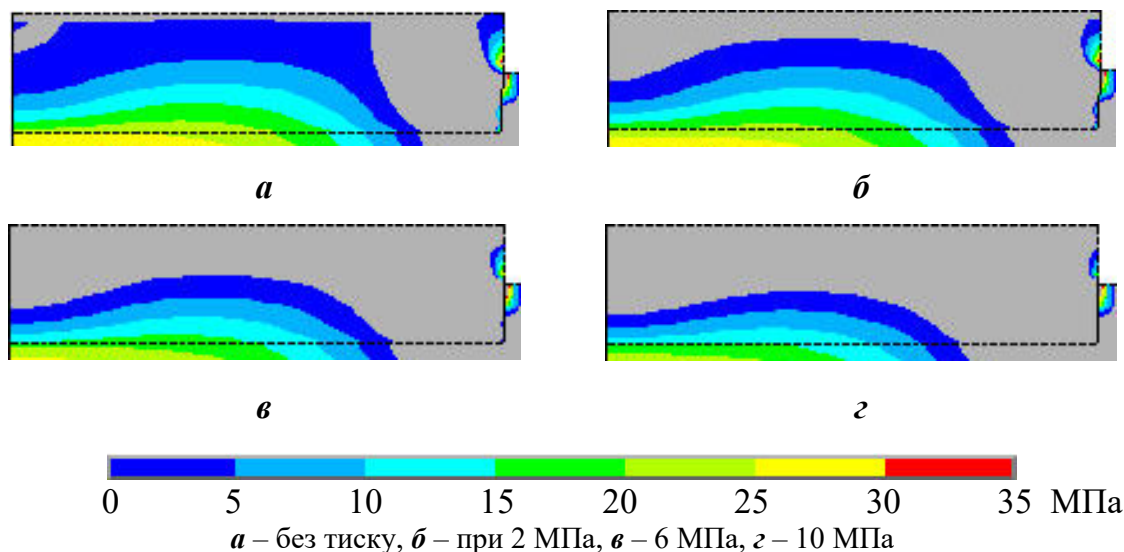


Рисунок 5.11. Поля осьових напружень σ_y в тугоплавкому матеріалі з врахуванням деформації повзучості та з витримкою за температурами у часі

З рис. 5.12 видно, що максимальні осьові напруження розтягу σ_y в тугоплавкому матеріалі при прикладенні тиску зменшуються з 37 МПа без навантаження до 33,9 МПа при прикладенні 2 МПа, до 27,6 МПа при прикладенні 6 МПа, до 19,1 МПа при прикладенні 10 МПа.

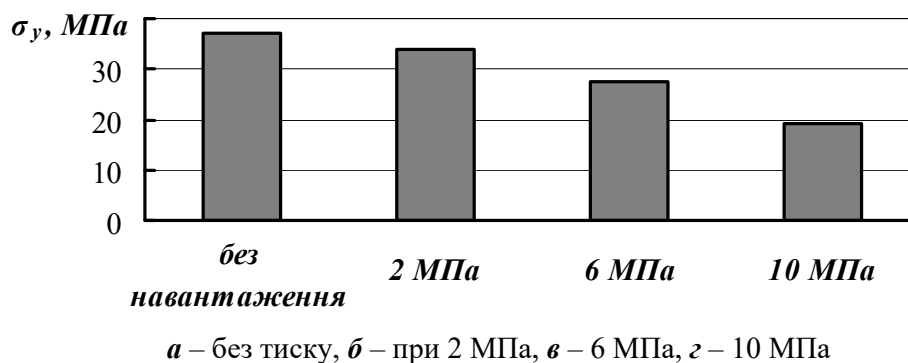
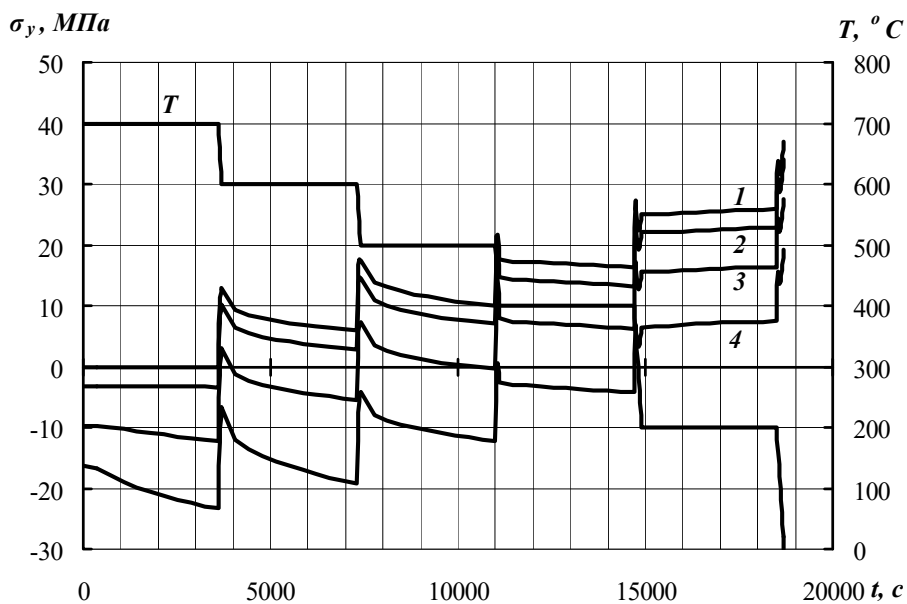


Рисунок 5.12. Рівні максимальних осьових розтягу напружень σ_y в тугоплавкому матеріалі з врахуванням деформації повзучості та з витримкою за температурами у часі

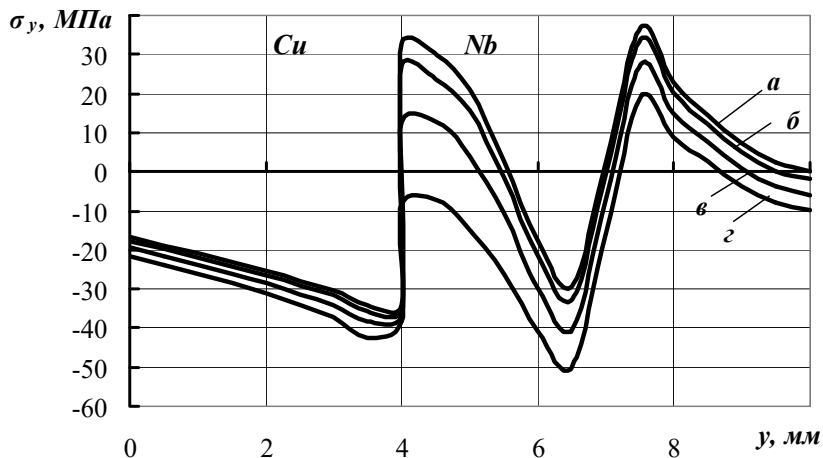
Величини осьових напружень (рис. 5.13) при витримці за температурами у часі зменшуються, а при охолодженні різко зростають до величин більших від тих, які були на початку витримки, а при наступній витримці знову зменшуються, але вже до значень менших ніж при попередній витримці.



1 – без тиску, 2 – при 2 МПа, 3 – 6 МПа, 4 – 10 МПа

Рисунок 5.13. Епюри максимальних осьових напружень σ_y в точці **Б** від часу

Характер кривих на рис. 5.14 однаковий.



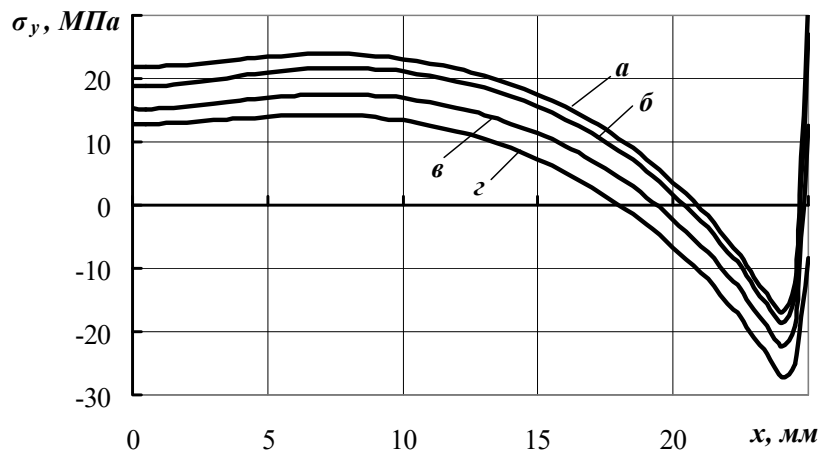
a – без тиску, *б* – при 2 МПа, *в* – при 6 МПа, *з* – при 10 МПа за перерізом 3-3

Рисунок 5.14. Епюри осьових напружень σ_y в тупоплавкому матеріалі з врахуванням деформації повзучості та з витримкою за температурами у часі

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Мінімуми та максимуми напружень в тугоплавкому матеріалі знаходяться на однакових відстанях від бокової поверхні складеного катоду для іонно-плазмового напilenня: максимум на відстані 2,5 мм, мінімум – 3,5 мм.

З рис. 5.15 видно, що криві осьових напружень мають однаковий характер. Максимуми напружень кривих знаходяться на боковій поверхні тугоплавкого матеріалу, а мінімуми на відстані приблизно 1 мм від неї.

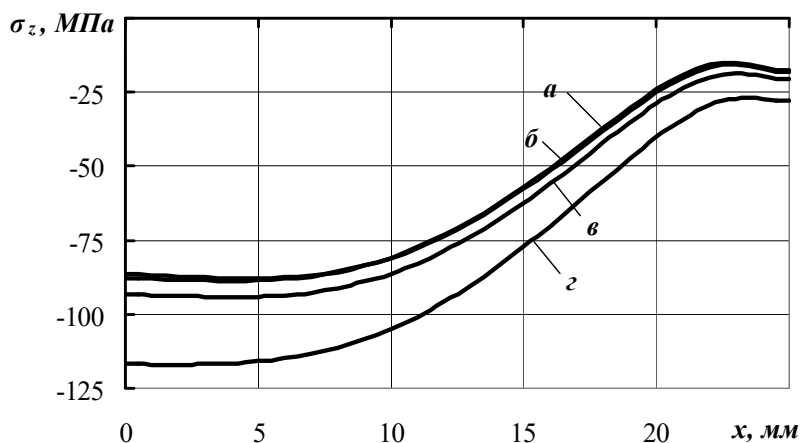


a – без тиску, *б* – при 2 МПа, *в* – при 6 МПа, *з* – при 10 МПа за перерізом 2-2

Рисунок 5.15. Епюри осьових напружень σ_y в тугоплавкому матеріалі з врахуванням деформації повзучості та з витримкою за температурами у часі

5.4. Дослідження конструкції за тангенціальними напруженнями

Розтягуючі тангенціальні напруження σ_z в ніобію відсутні (Рис. 5.16).



a – без тиску, *б* – при 2 МПа, *в* – при 6 МПа, *з* – крива при 10 МПа за перерізом 1-1

Рисунок 5.16. Епюри тангенціальних напружень σ_z в тугоплавкому матеріалі з врахуванням деформації повзучості та з витримкою за температурами у часі

5.5. Дослідження конструкції за дотичними напруженнями

Концентрація дотичних напружень в конструкції найбільш придатної моделі (рис. 5.17) спостерігається в точці В.

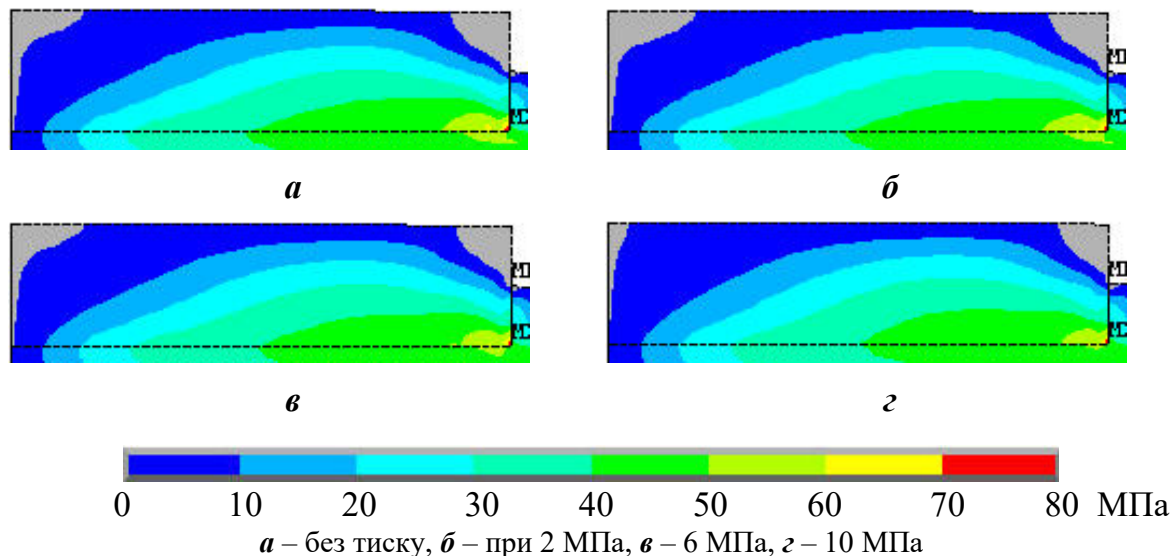


Рисунок 5.17. Поля дотичних напружень τ_{xy} в тугоплавкому матеріалі з врахуванням деформації повзучості та з витримкою за температурами у часі

Як видно з рис. 5.18 максимальні напруження τ_{xy} в тугоплавкому матеріалі зі збільшенням тиску зменшуються з 84,6 МПа без прикладення тиску до 84,5 МПа при прикладенні 2 МПа, до 84 МПа при прикладенні 6 МПа, до 83,7 МПа при прикладенні 10 МПа.

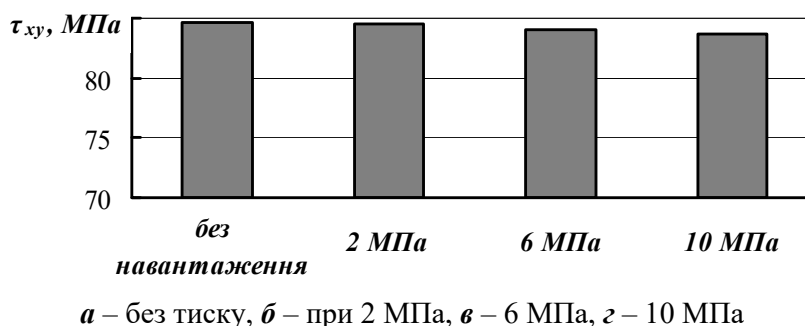
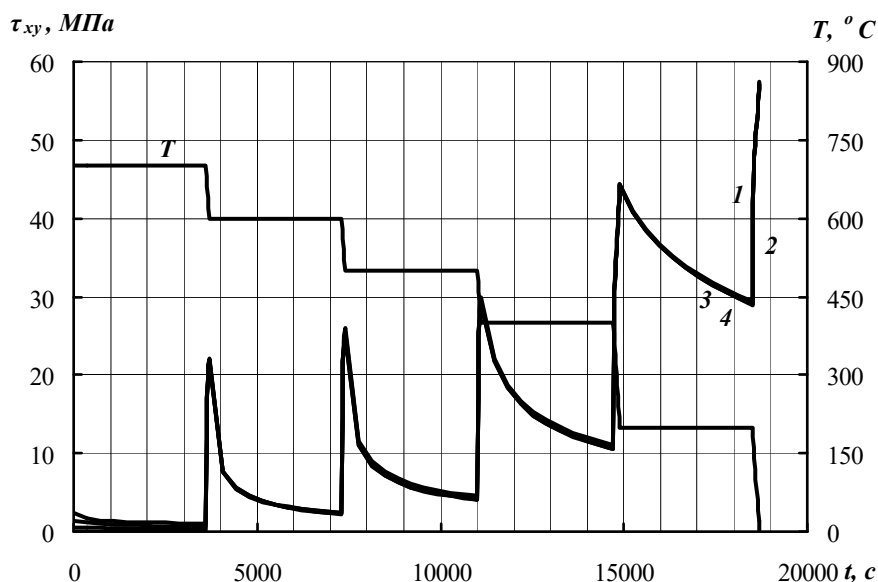


Рисунок 5.18. Рівні максимальних дотичних напружень τ_{xy} в тугоплавкому матеріалі з врахуванням деформації повзучості та з витримкою за температурами у часі

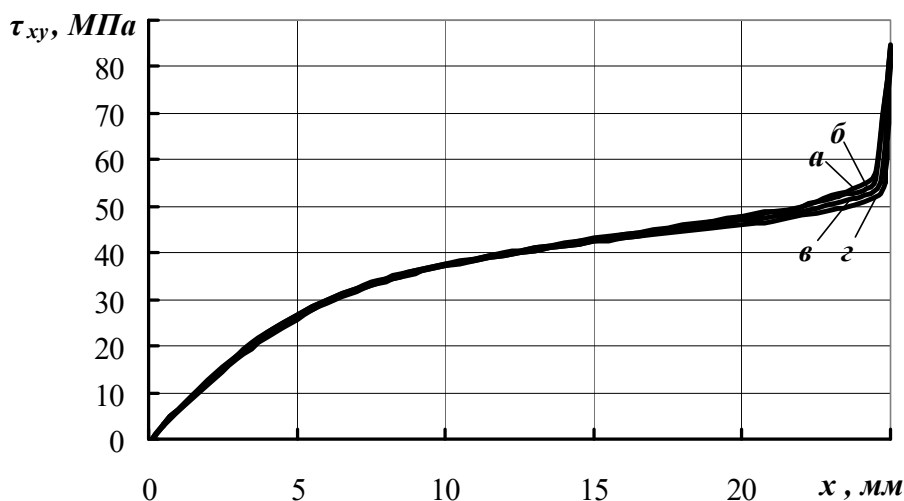
Як видно з рис. 5.19 величини дотичних напружень τ_{xy} майже однакові. При витримці за температурою напруження зменшуються, а при охолодженні різко зростають до величин більших від тих, які були на початку витримки, а при наступній витримці знову зменшуються, але вже до значень менших ніж при попередній витримці.



1 – без тиску, 2 – при 2 МПа, 3 – 6 МПа, 4 – 10 МПа

Рисунок 5.19. Епюри дотичних напружень τ_{xy} в критичній точці **B** від часу

Характер кривих на рис. 5.20 майже однаковий. Напруження зростають по мірі наближення до бокової поверхні випаровувача, де і досягають максимуму.



a – без тиску, *б* – при 2 МПа, *в* – при 6 МПа, *г* – крива при 10 МПа за перерізом 2-2

Рисунок 5.20. Епюри дотичних напружень τ_{xy} в тугоплавкому матеріалі з врахуванням деформації повзучості та з витримкою за температурами у часі

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР 8.132.6121м.01.06.05. ПЗ

Арк.
84

5.6. Порівняння результатів досліджень

Для зручності порівняння і вибору прикладеного тиску приведено рівні максимальних напружень в тугоплавкому матеріалі рис. 5.21.

Аналіз рис. 5.21 показав, що прикладення тиску та витримка при охолодженні на напружено-деформований стан в тугоплавкому матеріалі зменшує максимальні радіальні напруження розтягу σ_x ; максимальні осьові напруження розтягу σ_y ; максимальні напруження τ_{xy} .

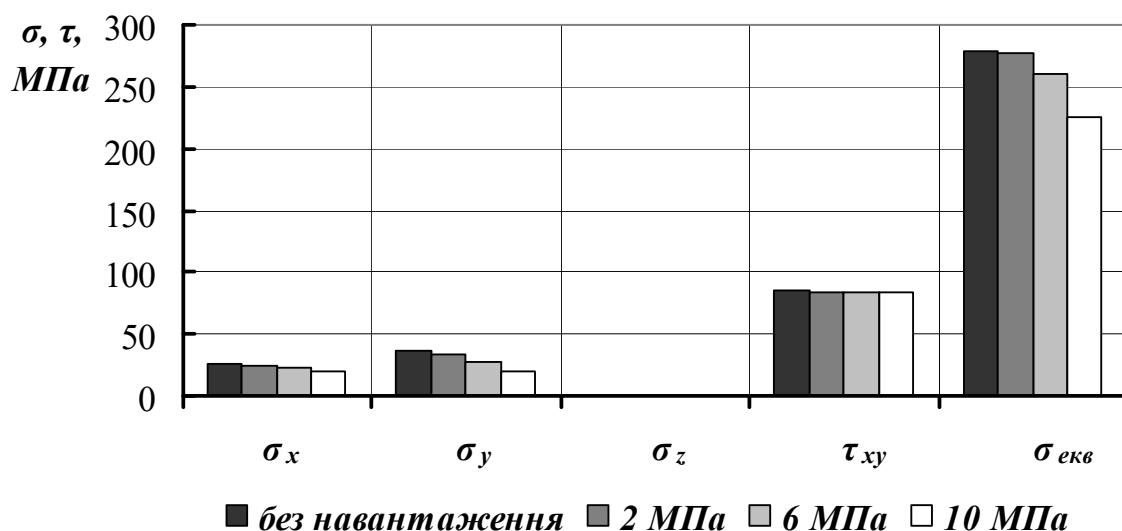


Рисунок. 5.21. Максимальні напруження у випаровувачі з тугоплавкого матеріалу при прикладенні тиску

Висновки

1. Установлено, що повзучість міді при охолодженні сприяє зниженню рівня власних напружень за рахунок релаксації.

2. При повзучості міді в процесі охолодження з'єднання зі швидкістю 1 град/сек., рівень напружень зменшується: радіальних на 2,2 МПа, осьових на 4,7 МПа, дотичних – 11,7 МПа. Вплив деформацій повзучості зростає при збільшенні часу охолодження.

3. Установлено, що більш ефективно зменшує власні напруження ступінчате

охолодження з витримкою при температурах 700 °С, 600°С, 500°С, 400°С та 200 °С. Зниження небезпечних напружень у випаровувачі дорівнює: радіальних - 5,6 МПа, осьових - 17,9 МПа, дотичних – 1 МПа.

4. Доведено, що найбільш ефективно на зменшення максимальних напружень розтягу тугоплавкому матеріалів впливає режим охолодження під тиском. Чим більше значення прикладеного тиску (прикладали 2 МПа, 6 МПа та 10 МПа), тим більше спостерігається зменшення небезпечних напружень. Найменші максимальні напруження спостерігаються при охолодженні під тиском 10 МПа. Вони складають: радіальні – 20,5МПа, осьові – 19,1 МПа, дотичні – 83,7 МПа, порівняно з охолодженням без тиску: радіальні – 25,1 МПа, осьові – 37 МПа, дотичні – 84,6 МПа.

					MP 8.132.6121м.01.06.05. ПЗ	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					МР 8.131.6121м.01.06.06. ПЗ									
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка технології виготовлення катоду				Літ.		Арк.	Аркушів		
Розробив	Барабаш М.С.											87		
Перевірів	Матвієнко М.В.													
Рецензент												ХННІ НУК		
Н. Контр.														
Зав. каф.														

6 Розробка технології виготовлення катоду

Контактно-реактивним називається капілярне паяння, при якому припій утворюється в результаті контактно-реактивного плавлення матеріалів, що з'єднуються, проміжних покриттів або прокладок. Воно засноване на здатності деяких металів утворювати в місці контакту сплави (евтектики або тверді розчини), температура плавлення яких нижче температури плавлення будь-якого з металів, що з'єднуються.

При контактно-реактивному паянні немає необхідності в попередньому виготовленні припою. У ряді випадків, коли метали, що з'єднуються, не утворюють між собою подібного типу сплави, використовують проміжний прошарок або наносять покриття на поверхні, що з'єднуються, напиленням, гальванічним або яким-небудь іншим способом.

При контактно-реактивному паянні деталі необхідно стискати. Застосування невеликого тиску на першій стадії процесу створює кращий фізичний контакт між деталями, а також сприяє видавлюванню надлишку рідкої фази. Кількість рідкої фази можна регулювати зміною часу контакту, товщиною покриття або прошарку, тому що процес контактного плавлення припиняється після витрати одного з контактуючих матеріалів. Разом з надлишками рідкої фази вилучаються частки оксидів, присутність яких в спаяному шві може негативно вплинути на міцність з'єднання [25].

Контактно-реактивне паяння є трудомістким, але таким паянням, яке забезпечує високу якість з'єднання й застосовується, коли в процесі паяння необхідно забезпечити мінімальні зазори.

Якість спаяних з'єднань (міцність, герметичність, надійність і т.ін.) залежить від правильного вибору основного металу, припою, флюсу, способу нагрівання, величини зазорів, типу з'єднання [7].

Розташування припою на виробі, його форма й кількість відіграють не менш важливу роль в одержанні доброякісного спаю.

					MP 8.132.6121м.01.06.06. ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6.1. Матеріали та обладнання для паяння

Залежно від призначення, припої готують у вигляді дроту, прутків, фольги, штампованих кілець, пасти з порошків і т.д.

Припій у вигляді фольги перед паянням закладають безпосередньо усередину шва. Шов при цьому повинен бути обов'язково відкритим; розташування припою в закритому шві не рекомендується. Товщина фольги повинна бути такою, щоб після розплавлення спаяний шов був повністю заповнений припоєм; при цьому на шов зверху необхідно прикласти певний тиск. Обрано титанову фольгу, товщиною 0,1 мм.

В атмосферних умовах метали покриті окислами. При окисненні міді утворюються три види окислів – закис міді Cu_2O , окис міді CuO і полуторна окис міді Cu_2O_3 . Є також припущення про утворення в інтервалі $950-1050^\circ\text{C}$ з'єднань типу недокисі Cu_4O .

Ніобій при нагріванні до 330°C окисної плівки не утворює. При температурі вище 400°C ніобій окислюється з утворенням низькотемпературної модифікації окислу $\alpha\text{-Nb}_2\text{O}_5$, під яким поступово залягають фази Nb_2O , NbO і насичений киснем шар металу. При температурах $830-900^\circ\text{C}$ відбувається повільне перетворення низькотемпературної модифікації $\alpha\text{-Nb}_2\text{O}_5$ у високотемпературну $\beta\text{-Nb}_2\text{O}_5$.

Забезпечення взаємодії металів, що паяються, та розплавленої фольги при наявності на їх поверхні окисних плівок неможливо. З цією метою їх необхідно ретельно очистити від окисних плівок і забруднень. Але за час між очищенням і паянням на поверхні металів знову утворюється тонка окисна плівка. Тому безпосередньо в процесі паяння необхідно видаляти окисну плівку не тільки з металу, що паяється, але і з розплавленого припою, що досягається застосуванням при паянні флюсів, штучних газових середовищ, вакууму, а також фізико-механізованими способами руйнування окисної плівки [20].

Для забезпечення взаємодії металів, що паяються, та розплавленої фольги обрано застосування вакууму, який захищає від окиснення і сприяє видаленню з поверхні металу окисної плівки. Механізм впливу вакууму на окисну плівку полягає в

					MP 8.132.6121м.01.06.06. ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зниженні парціального тиску кисню на основний метал. Вакуум утворюється шляхом відкачування газу насосами з контейнера або печі, в яких виконується паяння.

За ступенями розрідженості P вакуум буває:

- низький $P < 10^{-1}$ мм. рт. ст. - для паяння не застосовується;
- середній $P < 10^{-4}$ мм. рт. ст. - для паяння бронзи, сталей всіх класів, нікелю;
- високий $P > 10^{-4}$ мм. рт. ст. - для паяння титану, танталу, цирконію, ніобію.

Видалення повітря, що містить кисень, з камери паяння вакуумними насосами буде визначати стан поверхні металу і її підготовленість до пайки. Чим вище вакуум, тим більші можливості для запобігання утворення окислів і дисоціації їх.

Паяння виробів у вакуумі вимагає складного устаткування для відкачки повітря - вакуумних насосів, які підбираються залежно від необхідного вакууму й вакуумованого обсягу з урахуванням завантаження виробами камери паяння.

Роль вакууму в процесі паяння полягає в тому, щоб запобігати утворенню окислів за рахунок реакції металу з киснем і створювати умови для відновлення, випаровування або дисоціації окислів у випадку їх утворення. При цьому слід враховувати, що реакції газу з окислами зворотні і для направлення їх при паянні металів у бік відновлення окислів необхідно створити проточне середовище, що унесе газоподібний продукт реакцій - кисень.

Паяння виконано у вакуумній установці УДСВ-ДТ.

6.2. Режим паяння

Контактно-реактивне паяння міді з ніобієм, що з'єднуються, з прошарком фольги з титану при виготовленні складеного катоду для іонно-плазмового напилення буде виконуватися за режимом вказаним в таблиці 6.1.

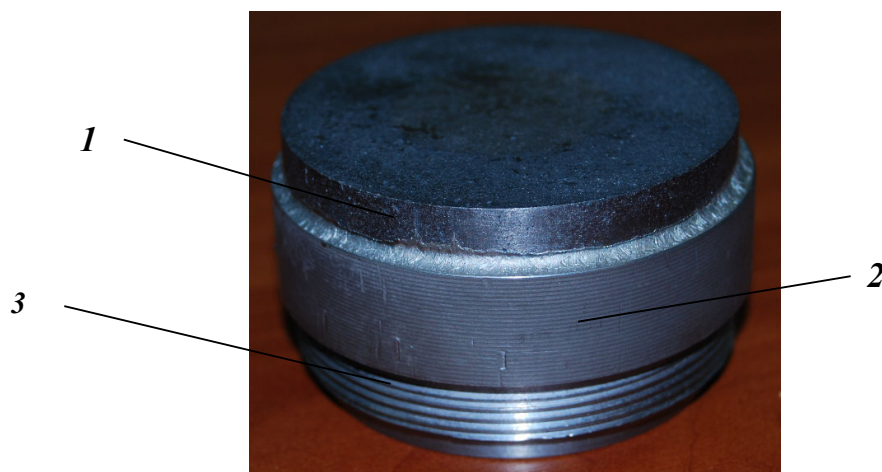
Охолодження ступінчате (5 годин) через 100°C з витримкою за температурою 1 година. Термоцикл зображений на рис. 5.3.

У результаті виконаного паяння отримано складений катод з різьбою (3) для іонно-плазмового напилення, який складається з мідного корпусу (1) і випаровувача з ніобію (2), зображений на рис. 6.1.

					MP 8.132.6121м.01.06.06. ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 6.1. Режим паяння у вакуумній установці УДСВ-ДТ

Параметри режимів паяння	Величини
Температура паяння, °С	950-960
Тиск	10
Час паяння, хв	7
Вакуум, Па	10^{-2}



1 – випаровувач з з тугоплавкого матеріалу; 2 - основний мідний корпус; 3 - різьба

Рисунок 6.1. Складений катоду з різьбою для іонно-плазмового напилення

6.3. Економія матеріалу при застосування технології виготовлення катоду

Економія матеріалів набуває важливої ролі в поглибленні інтенсифікації процесу виробництва. Необхідно дотримуватись раціонального вибору та використання матеріалів.

Матеріали утілюють важливий бік матеріальних витрат. Їх технічні та економічні властивості, вартість виготовлення та експлуатація є важливими критеріями економії.

Для оцінки економії матеріалів необхідно порівняти витрати при використанні одних та інших матеріалів.

Було розглянуто два випадки:

катод для іонно-плазмового напилення тугоплавких матеріалів виготовлено

повністю з тугоплавкого матеріалу;

катод для іонно-плазмового напилення тугоплавких матеріалів виготовлено з двох деталей: випаровувача з тугоплавкого матеріалу та мідного корпусу.

Витрати на матеріали, при виготовленні катоду визначаються за формулою:

$$B = m \cdot C \quad (6.1)$$

де C – вартість 1 кг матеріалу, що використовується, грн./кг; m – маса катоду, кг.

Витрати на матеріали, що з'єднуються, при виготовленні складеного катоду визначаються за формулою:

$$B = m_v \cdot C_v + m_k \cdot C_k, \quad (6.2)$$

де m_v – маса випаровувача катоду (таблиця 6.2), кг; C_v – вартість 1 кг матеріалу, що використовується для виготовлення випаровувача (таблиця 6.2), грн./кг; m_k – маса корпусу катоду, кг; C_k – вартість 1 кг матеріалу, що використовується для виготовлення корпусу складеного катоду (таблиця 6.2), грн./кг;

Маса випаровувача розраховується, виходячи з геометричних розмірів та властивостей матеріалів, з яких його виготовлено:

$$m_v = \rho \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_v}{2}\right)^2 \cdot b, \quad (6.3)$$

де ρ – густина матеріалу (таблиця 6.2), г/см³; d_v – діаметр випаровувача (рис. 6.3), см; b – висота випаровувача (рис. 6.3), см.

Маса корпусу розраховується також, виходячи з геометричних розмірів та властивостей матеріалів, з яких його виготовлено:

$$m_k = \rho \cdot \pi \cdot \left[\left(\frac{d_k}{2}\right)^2 \cdot H + h_1 \cdot \left[\left(\frac{d_k}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_v}{2}\right)^2 \right] + h_2 \cdot \left[\left(\frac{d_p}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_o}{2}\right)^2 \right] \right], \quad (6.4)$$

де ρ – густина матеріалу (таблиця 6.2), г/см³; d_k – діаметр корпусу катоду (рис. 6.2), см; H – висота основної частини корпусу катоду (рис. 6.2), см; h_1 – висота поглиблення в корпусі (рис. 6.2), см; d_v – діаметр випаровувача (рис. 6.2), см; h_2 – висота різьби корпусу (рис. 6.2), см; d_p – діаметр різьби корпусу катоду (рис. 6.2), см; d_o – діаметр отвору в різьбі корпусу катоду (рис. 6.2), см.

					MP 8.132.6121м.01.06.06. ПЗ	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 6.2. Вихідні дані матеріалів, з яких виготовлено катод

Матеріал	Cu	Nb	Mo	Ta	Zr
Показники					
Марка	МО	Нб-1	МЧ	ТВЧ	ЦОГ
Вартість, грн./кг	265	10800	5880	22500	3500
Густина, кг/см ³	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$8,56 \cdot 10^{-3}$	$10,2 \cdot 10^{-3}$	$16,6 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$

За формулою 6.3, використовуючи вихідні дані (таблиця 6.2), розраховано маси випаровувачів з різних тугоплавких матеріалів. За формулою 6.4 розраховано масу корпусу катоду з цих самих матеріалів. Підставивши розраховані дані в формулу 6.1, отримано витрати на матеріали при виготовленні усього катоду з тугоплавкого матеріалу. Результати зведені до таблиці 6.3.

За формулою 6.3 розраховано масу мідного корпусу катоду – 1,001 кг. Підставляючи отримані дані в формулу 6.2, отримано витрати на матеріали при виготовленні складеного катоду з міді та тугоплавкого матеріалу. Результати зведені до таблиці 6.3.

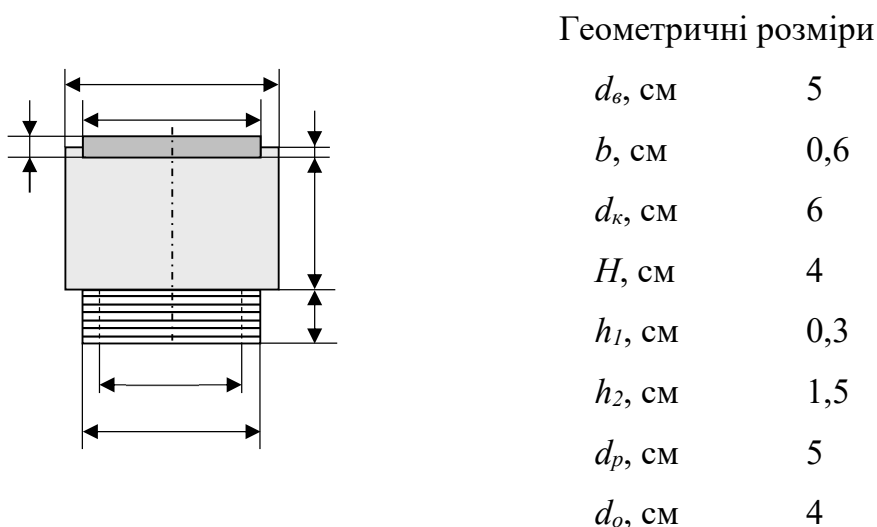


Рис. 6.2. Поперечний перетин з'єднання

Аналіз результатів розрахунків (таблиця 6.3) показав, що при використанні мідного корпусу в катодах для іонно-плазмового напilenня відбувається економія витрат на матеріали, що напилються. А саме при виготовленні катода з:

ніобію на 89,12 %;

молібдену на 87,85%;
танталу на 90,89%;
цирконію на 81,13%.

Таблиця 6.3. Результати розрахунків

Показники	Nb	Mo	Ta	Zr
Маса випаровувача, г	100,8	120,1	195, 5	70,7
Маса корпусу, г	1080,5	1287,5	2095,4	757,4
Витрати при виготовленні катоду з тугоплавкого матеріалу, грн.	12758,1	8276,87	51544,12	2898,06
Витрати при виготовленні складеного катоду, грн.	1388,29	1005,93	4697,68	546,99
Різниця, грн.	11369,81	7270,94	46846,44	2351,07
Економія, %	89,12	87,85	90,89	81,13

Економія с точки зору використання матеріалів охоплює перш за все наступний комплекс проблем:

1. Застосування конструкцій, високопродуктивної технології, що зберігає матеріали, заміни матеріалів.
2. Підвищення працездатності виробу за допомогою правильного конструювання при оптимальній надійності.

Результати розрахунків приведені в таблиці 6.3, показали, що в роботі було вирішено проблеми економії та раціонального використання матеріалів.

Висновки

1. Складений катод для іонно-плазмового напilenня виконано на вакуумній установці УДСВ-ДТ контактнo-реактивним паянням з прошарком з титанової фольги товщиною 0,1 мм і прикладенням тиску 10 МПа.

2. Застосовано ступінчате охолодження (5 годин) через 100°C з витримкою за температурами 1 година.

3. Розрахунок економії матеріалу при застосування технології виготовлення

					MP 8.132.6121м.01.06.06. ПЗ	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складеного катоду паянням показав, що при застосування обраної найбільш придатної конструктивної моделі використання матеріалів є більш раціональним оскільки забезпечує економію матеріалів на рівні: ніобію на 89,12 %; молібдену на 87,85%; танталу на 90,89%; цирконію на 81,13%.

					MP 8.132.6121м.01.06.06. ПЗ	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальні висновки

Аналіз способів з'єднання міді з ніобієм, його лігатурою, молібденом, танталом, цирконієм та їх сплавами показав, що найбільш перспективним є дифузійне зварювання і паяння, зокрема дифузійне зварювання з прокладкою, яка розплавляється, в літературі відоме ще під назвами зварювання-паяння з тиском або паянням з тиском. При цьому найбільш доцільно для з'єднання використовувати розплав, що утворюється внаслідок контактної-реактивного плавлення міді і фольги активного металу, зазвичай титану. Кількість розплаву регулюється товщиною фольги і температурою процесу.

Основною проблемою з'єднання міді з ніобієм та іншими тугоплавкими металами є формування власних напружень при охолодженні з'єднання, для дослідження яких вибрано МКЕ і реалізовано за допомогою програмного комплексу ANSYS.

З метою оптимізації конструкції катода для напilenня тугоплавких металів за рівнем власних напружень досліджено напружений стан шести можливих варіантів конструкції. Встановлено вплив фізико-механічних властивостей матеріалів і геометричних характеристик конструкції на рівень та розподіл власних напружень і деформацій у вузлах, що складаються з корпусу і шайби металу для іонно-плазмового напilenня.

Дослідження напружено-деформованого стану в границях пружності показало, що найбільш перспективним є варіант 4, який забезпечує мінімальний рівень залишкових напружень як в зоні стику так і в тугоплавкому матеріалі.

Дослідження напружено-деформованого стану в умовах миттєвої пластичності підтвердили оптимальність варіанту 4 конструкції катода, яка вибрана для практичної реалізації і подальших досліджень.

Показано, що в умовах повзучості міді при охолодженні з'єднання зі швидкістю 1 град./сек. власні напруження знижуються за рахунок релаксації.

Установлено, що більш ефективним для релаксації напружень є режим ступінчатого охолодження з'єднання, порівняно з безперервним.

Найбільш сприятливим для формування власних напружень низького рівня є

					MP 8.132.6121м.01.06. ПЗ	Арк.
						96
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

режим ступінчатого охолодження вузла під зовнішнім тиском. Доведено, що зі збільшенням напружень стиску до 10 МПа значення небезпечних максимальних напружень розтягу є найменшими.

За результатами досліджень розроблено рекомендації щодо конструкції іонно-плазмового катоду і технологію його виготовлення, що дозволяють зменшити витрати висококоштовних металів на 80...90 %.

					МР 8.132.6121м.01.06. ПЗ	Арк.
						97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список літератури

1. О.М. Дубовой, А.М. Степанчук Технологія напилення покриттів: Підручник. – Миколаїв: НУК, 2007. – 236 с.
2. Соединение труб из разнородных металлов/С.Н. Киселев, Г.Н. Шевелев, В.В. Рощин и др. – М.: Машиностроение, 1981. – 176 с., ил..
3. Рабкин Д.М., Рябов В.Р., Гуревич С.М. Сварка разнородных металлов. М. «Техніка», 1975, 208 с.
4. [Сварка](#) в машиностроении: Справочник / Под ред.. Н.А. Олышанского. – М.: Машиностроение, 1978. – Т.1 – 502 с.
5. Квасницький В.В. Спеціальні способи зварювання: Навчальний посібник. - Миколаїв: УДМТУ, 2003. - 437с.
6. Пайка и термическая обработка деталей в газовой среде и вакууме. Есенберлин Р.Е., Л. «Машиностроение», 1972 г. 184 стр. Табл. 45. Илл. 61. Библ. 76 назв.
7. Лашко С.В., Лашко Н.Ф. Пайка металлов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.: ил.
8. Паяння матеріалів. Дослідження фізико-хімічних процесів та технологічних факторів паяння / В.В. Квасницький, В.Ф. Квасницький, Б.В. Бугаєнко, Г.В. Єрмолаєв; Під наук. ред. В.Ф. Квасницького. – Миколаїв: НУК, 2006. – 160 с.
9. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
10. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
11. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. – К.: Наукова думка, 1982. – 552с.
12. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
13. Сегелинд Л. Применение метода конечных элементов: Пер. с англ../А.А. Шестакова, Б.Е. Победри. – М.: Мир, 1979. – 393 с.
14. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. - 272 с.

					МР 8.132.6121м.01.06. ПЗ	Арк.
						98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

15. В.П. Антонов, В.А. Бачин, Г.В. Закорин, В.Н. Казаков и другие Диффузионная сварка материалов: Справочник / Под ред.. Н.Ф. Казакова. – М.: Машиностроение, 1981. – 271 с., ил.
16. А.П. Гуляев Металловедение: 5-е переработанное издание. – Москва: «Металлургия», 1977. – 647 с.
17. А.Т. Туманова, К.И. Портного Тугоплавкие материалы в машиностроении: Справочник. – Москва: «Машиностроение», 1967. – 392 с.
18. Е.Н. Штанов, И.А. Штанова Цветные металлы и сплавы. – Н.Новгород: Издательство: «Вента-2», 1994. – 800 с.
19. Ермолаев Г.В. Сварочные деформации и напряжения: Конспект лекций. – Миколаїв: НКІ, 1975. – 70 с.
20. Пайка металлов. Петрунин И.Е., Лоцманов С.Н., Николаев Г.А. М., «Металлургия», 1973, 2-е изд., с. 280.
21. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т.2 / Под общ. Ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – 1024 с., ил. 5.
22. К. Бреббия и др.. Методы граничных элементов: Пер. с англ. / Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. – М.: Мир, 1987. – 524 с., ил.
23. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. Ansys для инженеров: Справочное пособие. – М.: Машиностроение – 1, 2004. – 512 с.
24. Уравнение и краевые задачи теории пластичности и ползучести. Справочное пособие / Писаренко Г.С., Мохаровский Н.С. – Киев: Наук. думка, 1981. – 496 с.
25. Цены российского рынка на металлы и сырье [Электронный ресурс]: Цветные и черные металлы. Ферросплавы, сырье. Рынки, цены, тенденции. – Режим доступа к сайту.: <http://www.infogeo.ru/metalls/price/>.
26. Жидецкий В.Ц. Основы охорони праці. Підручник. – Львів: Афіша, 2002. – 320 с.
27. Боград В.М., Коваль В.И., Скороходов В.А. Охрана труда в судостроении: Учебное пособие. – СПб.: Судостроение, 1992. – 288 с.
28. Щедролюсєв О.В., Моїсєєнко Л.Л., Яглицький Ю.К. Основы охорони праці. Лабораторний практикум. – Херсон: Айлант, 2005. – 84.

					МР 8.132.6121м.01.06. ПЗ	Арк.
						99
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

29. Тубальцев А.М. Виробниче освітлення та його розрахунок: навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2001. – 84 с.

30. Коваль Л.П. Вентиляция помещений при постройке и ремонте судов. - Николаев: НКИ, 1977- 314 с.

31. Білявський Г.О. Основи загальної екології. Підручник / Г.О Білявський, М.М. Падун, Р.С. Фурдуй. – 2-ге вид., зі змінами. К.: Либідь, 1993. – 368 с.

32. Пістун І.П., Тубальцев А. М., Тубальцева Н.П. Охорона праці в суднобудуванні: Навчальний посібник. – Львів: «Тріада плюс», 2009. – 580 с.

33. Депутат О.П., Коваленко І. В., Мужик І.В. Цивільна оборона: Навчальний посібник / За ред. В.С. Франчука. – Львів, Афіша, 2000. – 336с.

34. Михайлюк В.О. Цивільний захист: Навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2004. – Ч. 3 Цивільна оборона. – 140 с.

35. Михайлюк В.О., Ізотов В.І., Штейн П.В. Методичні вказівки до виконання розділу з питань безпеки життєдіяльності та цивільної оборони у дипломних роботах (проектах) студентів. – Миколаїв: НУК, 2009. – 56 с.

					МР 8.132.6121м.01.06. ПЗ	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Анотація

Магістерська робота присвячена розробці конструкції іонно-плазмового катоду для нанесення вакуумно-конденсаційних покриттів із тугоплавких металів. Проаналізовано сучасні методи нанесення покриттів та обґрунтовано доцільність використання складених катодів на основі поєднання міді з тугоплавкими металами (ніобієм, молібденом, танталом, цирконієм). Показано, що основною проблемою таких з'єднань є виникнення власних напружень через відмінність фізико-механічних властивостей матеріалів.

Досліджено способи з'єднання міді з тугоплавкими металами та встановлено, що найбільш перспективним є дифузійне зварювання з прокладкою, яка розплавляється (паяння з тиском). Для аналізу напружено-деформованого стану з'єднань застосовано метод скінченних елементів у програмному комплексі ANSYS. Проведено моделювання декількох варіантів конструкції катоду та визначено оптимальний, що забезпечує мінімальний рівень залишкових напружень.

Розроблено рекомендації щодо конструкції іонно-плазмового катоду та технології його виготовлення, що дозволяють зменшити витрати дорогих тугоплавких металів на 80–90 %.

Ключові слова: іонно-плазмове напылення, вакуумно-конденсаційні покриття, катод, тугоплавкі метали, дифузійне зварювання, паяння з тиском, метод скінченних елементів, ANSYS, залишкові напруження.

Abstract

The master's thesis is devoted to the development of the design of an ion-plasma cathode for the deposition of vacuum-condensation coatings made of refractory metals. Modern coating deposition methods are analyzed, and the feasibility of using composite cathodes based on the combination of copper with refractory metals (niobium, molybdenum, tantalum, zirconium) is substantiated. It is shown that the main problem of such joints is the formation of residual stresses caused by differences in the physical and mechanical properties of the materials.

Methods for joining copper with refractory metals were investigated, and it was established that the most promising method is diffusion welding with a melting interlayer (pressure brazing). The stress-strain state of the joints was analyzed using the finite element method implemented in the ANSYS software package. Several cathode design variants were modeled, and the optimal one providing the minimum level of residual stresses was determined.

Recommendations for the design of the ion-plasma cathode and its manufacturing technology were developed, which makes it possible to reduce the consumption of expensive refractory metals by 80–90%.

Keywords: ion-plasma deposition, vacuum condensation coatings, cathode, refractory metals, diffusion welding, pressure brazing, finite element method, ANSYS, residual stresses.