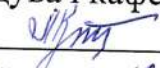


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально науковий інститут (факультет) Кораблебудівний
Кафедра будівельної механіки та конструкції корпусу корабля

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

 Л.І. Коростильов
« 25 » 12 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»
на тему: Дослідження концентрації напружень у
зварних конструктивних вузлах корпусу судна
наближеними методами

Виконав: студент 6116м групи

 **Чалиук Є.І.**
(підпис)

Керівник роботи:

ст. викл. каф. БМ та ККК, к.т.н.

(посада, науковий ступень вчене звання)

 **Литвиненко Д. Ю.**
(підпис)

Миколаїв – 2023 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально науковий інститут (факультет) Кораблебудівний

Кафедра будівельної механіки та конструкції корпусу корабля

Спеціальність 135 Суднобудування

Освітньо-професійна програма Конструювання та міцність корпусу суден і плавучих споруд

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

Л.І. Коростильов д.т.н., професор Коростильов Л.І.

«25» 12 2023 року

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

Чалюк Євген Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження концентрації напружень у зварних конструктивних вузлах корпусу судна наближеними методами»
«Research of stress concentration in welded structural joints of ship's hull using approximate methods»

Керівник роботи Литвиненко Д. Ю., к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора вищого навчального закладу від
«20» 11 2023 року № 1357-42

2. Строк подання студентом роботи 26.12.2023

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів):

1. Методи визначення коефіцієнтів концентрації напружень у зварних вузлах

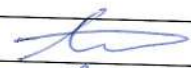
2. Стислий опис методу скінченних елементів

3. Аналіз наближених формул для розрахунку коефіцієнтів концентрації стикових

4. Наближена методика визначення коефіцієнтів концентрації зварних вузлів

5. Перелік презентаційних матеріалів:
 5.1 Презентація магістерської роботи
 5.2
 5.3

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	ПіБ консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Литвиненко Д. Ю.		
2	Литвиненко Д. Ю.		
3	Литвиненко Д. Ю.		
4	Литвиненко Д. Ю.		
5			

7. Дата видачі завдання 01.09.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Методи визначення коефіцієнтів концентрації напружень у зварних вузлах	20.09.2023	
2	Стислий опис методу скінченних елементів	10.10.2023	
3	Аналіз наближених формул для розрахунку коефіцієнтів концентрації стикових	10.11.2023	
4	Наближена методика визначення коефіцієнтів концентрації зварних вузлів	01.12.2023	
5	Оформлення пояснювальної записки	20.12.2023	

Студент


 (підпис)

Чалюк Є. І.
 (прізвище та ініціали)

Керівник роботи


 (підпис)

Литвиненко Д. Ю.
 (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	
1. Методи визначення коефіцієнтів концентрації напружень у зварних вузлах.....	
1.1. Концентрація напружень у зварних вузлах.....	
1.2. Підходи до визначення значень теоретичного коефіцієнту концентрації.....	
1.2.1. Визначення теоретичного коефіцієнту концентрації напружень у зварних з'єднаннях за допомогою тензовимірювання.....	
1.2.2. Визначення теоретичного коефіцієнту концентрації напружень у зварних з'єднаннях поляризаційно-оптичним методом.....	
1.2.3. Визначення теоретичного коефіцієнту концентрації напружень у зварних з'єднаннях за допомогою скінченно-елементного аналізу.....	
1.3. Висновки із розділу 1.....	
2. Стислий опис методу скінченних елементів.....	
2.1. Основні положення методу скінченних елементів	
2.2. Програмні комплекси скінченно-елементного аналізу.....	
2.3. Висновок із розділу 2.....	
3. Аналіз наближених формул для розрахунку коефіцієнтів концентрації стикових швів.....	
3.1. Наближені формули для розрахунку коефіцієнтів концентрації напружень у зварних стикових швах.....	
3.2. Порівняльний аналіз наближених формул для розрахунку коефіцієнтів концентрації напружень у зварних стикових швах із розрахунками методом скінченних елементів.....	
3.3. Висновки із розділу 3.....	

4. Наближена методика визначення коефіцієнтів концентрації зварних вузлів.....

4.1. Дослідження концентрації напружень у хрестоподібному з'єднанні.....

4.2. Висновки із розділу 4.....

ВИСНОВКИ.....

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....

ДОДАТОК А.....

ДОДАТОК Б.....

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність досліджень.

При статичних навантаженнях ефект концентрації є незначним, оскільки руйнування відбувається під дією напружень, що перевищують межу текучості матеріалу деталі, і йому передують значні пластичні деформації, внаслідок яких нерівномірність розподілу напружень зменшується як по контуру, так і по перерізу деталі. Однак значна кількість елементів конструкцій суден в процесі експлуатації сприймають велику кількість змін тимчасових навантажень, наприклад, вантажів, хвиль, вітру тощо. Змінні навантаження, що виникають при цьому, можуть викликати втомне руйнування цих конструктивних елементів.

Втомне руйнування відрізняється від статичного тим, що воно може бути наслідком прикладення невисоких напружень, іноді значно менших за межу текучості (багатоциклова втома), тому зазвичай воно відбувається без помітної попередньої макропластичної деформації. Таким чином, ефект вирівнювання напружень після досягнення межі текучості ідсутній, тому циклічні навантаження чутливі до концентрації напружень, а різного роду виточки, галтелі, отвори, надрізи, переходи зварних швів на основний метал тощо є потенціальними місцями передчасного зародження втомних тріщин.

Концентрація напружень у зварних конструкціях корпусу судна обумовлюється як загальною геометрією конструкції, так і параметрами зварного шва.

Так, для стикових зварних з'єднань формування зон підвищеної завантаженості обумовлено підсиленням шва, а технологія та режим зварювання визначають його основні параметри. Так, придуговому зварюванню зовнішній вигляд і розміри шва залежать від способу зварювання, зварювальних матеріалів, виду розділки кромek тощо.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До основних геометричних параметрів стикових швів відносять ширину g та висоту h підсилення шва, фланговий кут θ та радіус переходу від шва до основного металу r (рис. 1.1).

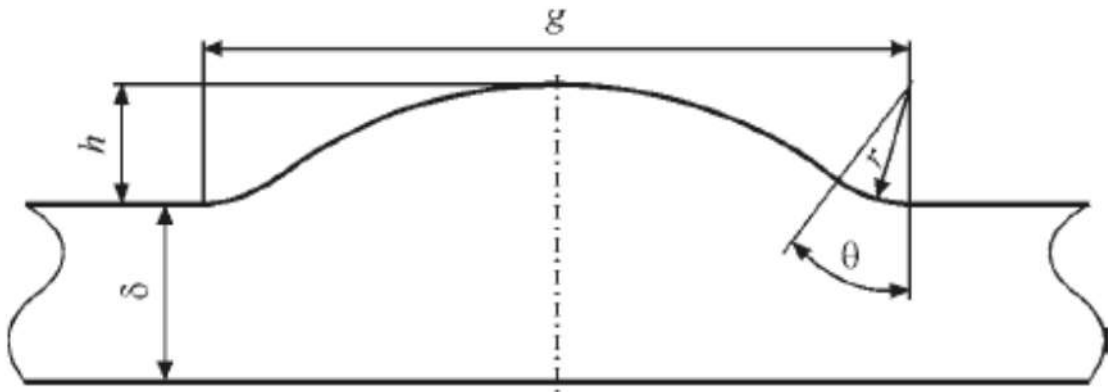


Рис. 1. Основні геометричні параметри стикового зварного з'єднання з одностороннім підсиленням

Ширина і висота підсилення визначають загальний обрис стикового шва, тоді як фланговий кут і радіус переходу від шва до основного металу характеризують гостроту концентратора в локальних зонах [1]. Тому у випадку ідеального стикового зварного з'єднання, у якого відсутні такі дефекти, як лінійні та кутові деформації в процесі зварювання, теоретичний коефіцієнт концентрації напружень (ТККН) визначається двома незалежними складовими, перша з яких обумовлена загальною геометрією зварного вузла та товщиною з'єднуваних елементів, а друга - геометрією зони переходу від шва до основного металу.

Оцінка теоретичного коефіцієнту концентрації одним з основних запобіжників передчасного руйнування зварних вузлів та елементів конструкцій.

Розрахунок теоретичного коефіцієнта концентрації напружень зварного з'єднання в конструкції суднового корпусу може являтися початковим етапом аналізу його втомної міцності в залежності в методу, що використовується.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Величина теоретичного коефіцієнта концентрації напружень може бути застосована для визначення його величини ефективного коефіцієнту контрації та наближеної оцінки границі витривалось відповідно. Розрахунок ТККН також є необхідним для порівняльного аналізу різних конструктивних варіантів зварних вузлів.

Створення «повної» геометричної моделі зварного суднокорпусного вузла у САД-системі, тобто детальної 2 або 3-вимірної моделі, яка є максимально подібною до реального виробу, з врахуванням моделювання форми зварного шва, може бути достатньо трудомістким. Значні трудовитрати також необхідні для випадку, коли досліджується та порівнюється декілька можливих конфігурацій конструктивного вузла. Трудомісткою також є розбивка розробленої моделі на скінченні елементи із заданим локальним розміром сітки. Виконання розрахунків на ЕОМ для такої скінченно-елементної моделі із густою локальною сіткою потребує значної кількості машинного часу. Одним із способів спростити визначення місцевого поля напружень і деформацій у випадку зварного вузла із складною геометрією є використання методу субмоделювання.

Для оцінки теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень стикових, таврових, хрестоподібних та інших розповсюджених на практиці типів зварних з'єднань в літературі представлена значна кількість наближених залежностей. Кожна з таких залежностей придатна для певних діапазонів співвідношень розмірних параметрів досліджуваних вузлів.

В задачах втомної міцності теоретичний коефіцієнт концентрації K_t є необхідним для врахування впливу геометричних особливостей досліджуваного суднокорпусного вузла на його втомну міцність.

Мета роботи – дослідити можливість розрахунку теоретичного коефіцієнта концентрації напружень у зварних вузлах наближеними методами.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

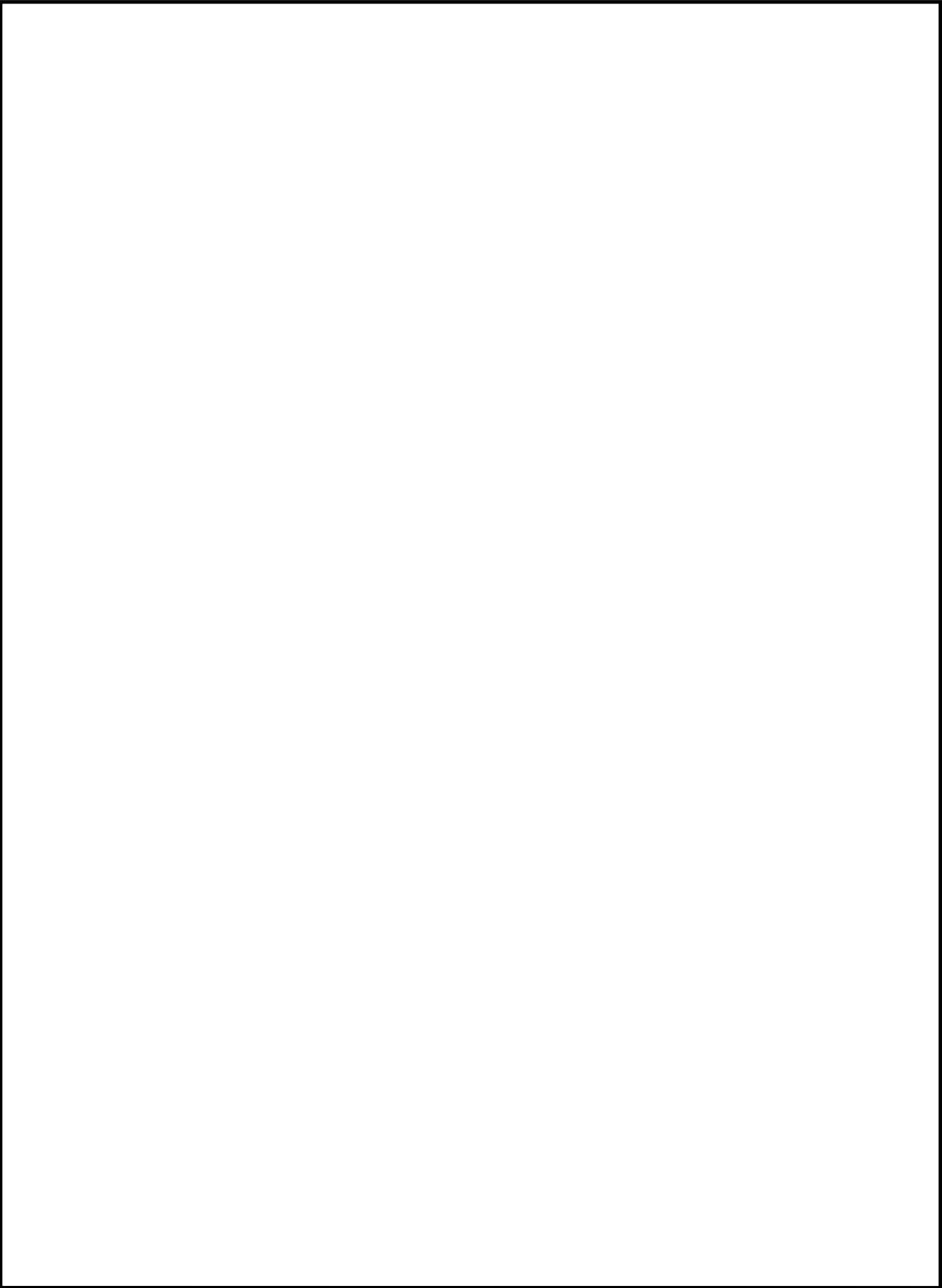
Завдання роботи:

1. Виконати опис методів визначення коефіцієнтів концентрації напружень у зварних вузлах. Вибрати метод досліджень.
2. Виконати стислий опис методу скінченних елементів.
3. Виконати аналіз наближених формул для розрахунку значень теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень у зварних стикових швах.
4. Виконати порівняльний аналіз результатів застосування зазначених формул та скінченно-елементного аналізу для визначення теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень у зварних стикових швах.
5. Перевірити можливості розрахунку теоретичного коефіцієнту концентрації зварних вузлів добутком коефіцієнтів концентрації від загальної геометрії вузла та фіктивного стикового шва із таким самим радіусом та кутом нахилу профілю шва в місці переходу від основного металу до металу шва.

Об'єктом дослідження є явище концентрації напружень у суднокорпусних вузла.

Предметом дослідження є спрощені формули для розрахунку концентрації напружень у зварних конструктивних вузлах.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.01			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Методи визначення коефіцієнтів концентрації напружень у зварних вузлах	№	Арк.	Підпис
Студент		Чалюк Є.І.						Акрушів
Керівник		Литвиненко Д. Ю.						Дата
Зав. каф.		Коростильов Л. І.				НУК		

РОЗДІЛ 1

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ ВУЗЛАХ

1.1 Концентрація напружень у зварних вузлах

Визначення локальних напружень в зонах зварних швів є досить проблематичним через невизначеності, що пов'язані з його геометрією в зоні переходу від металу шва до основного, формою зварного шва та ін. У зв'язку з цим зварні шви поділяють на категорії, що нормуються в залежності від типу шва, умов навантаження та ін.

Зміна геометрії деталей та властивостей їх матеріалу в зоні зварювання, власна форма шва призводять до нерівномірного розподілу напружень в такій зоні при навантаженні зварної конструкції (див рис. 1.1-1.3).

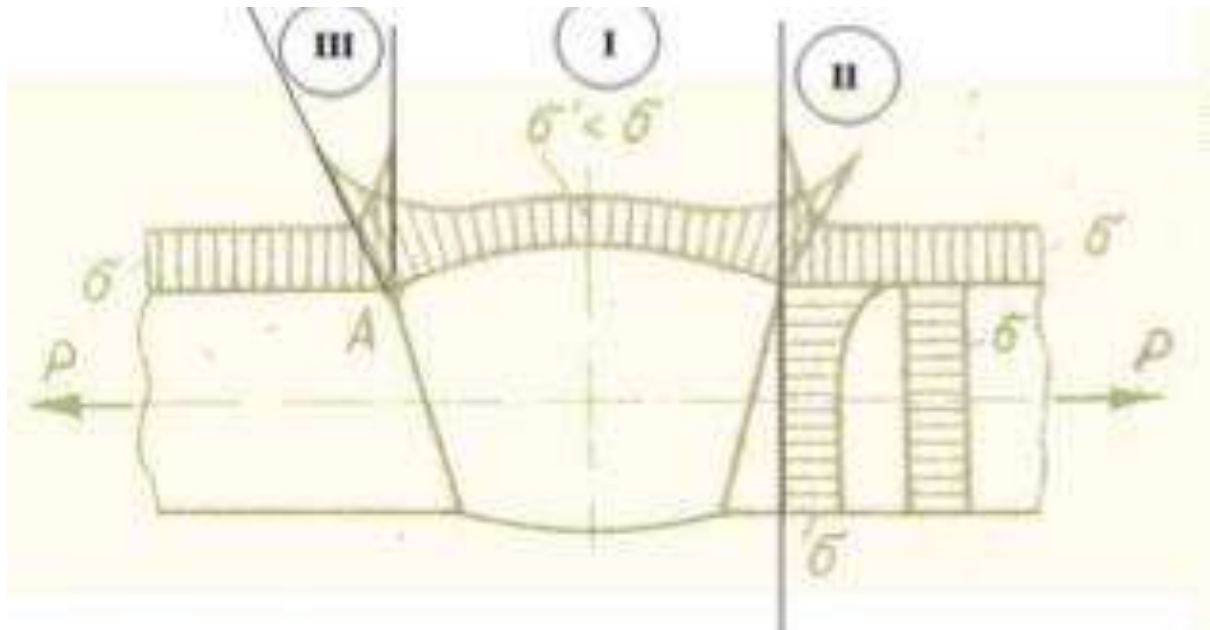


Рис. 1.1. Концентрація напружень у стикових з'єднаннях

						Арк.
Змн.	Арк.					

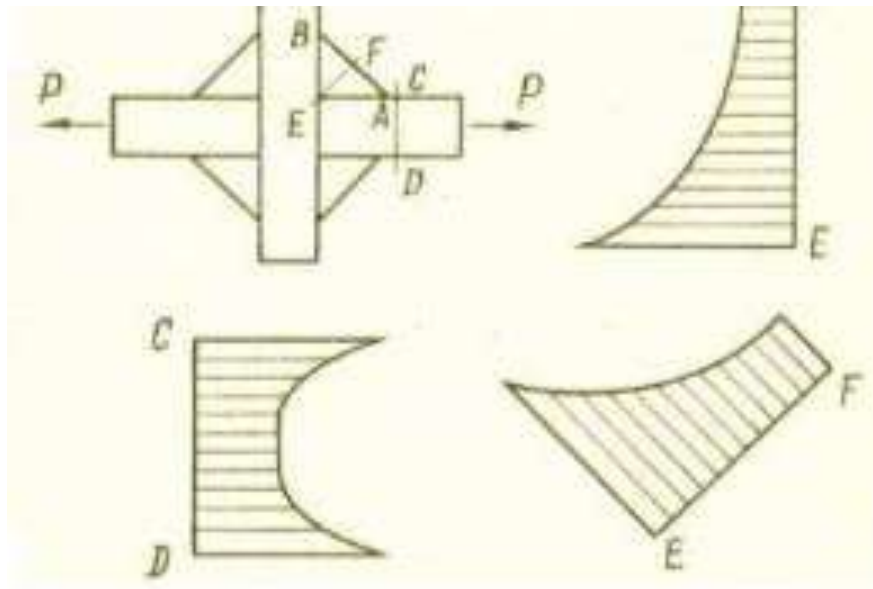


Рис. 1.2. Концентрація напружень у хрестоподібних з'єднаннях

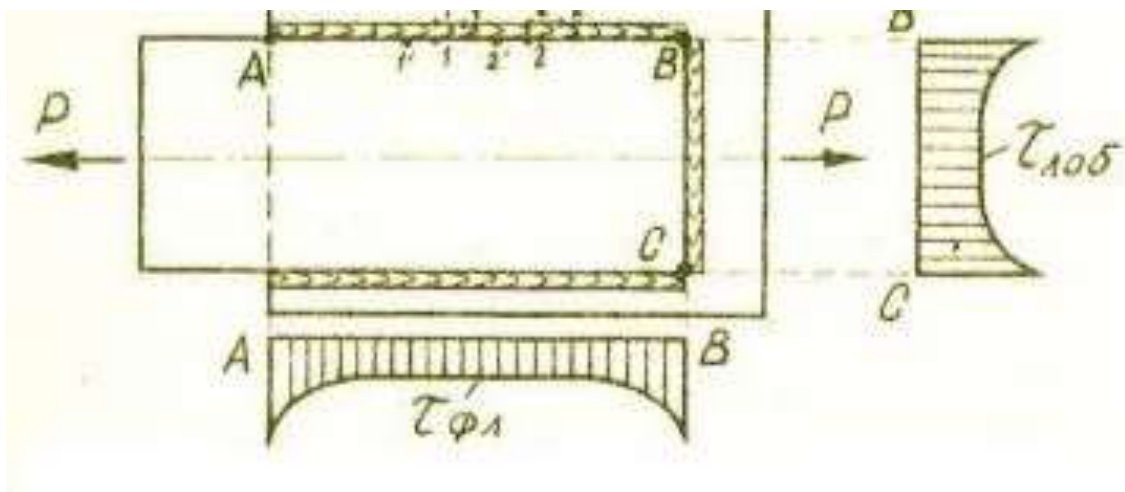


Рис. 1.3. Концентрація напружень у з'єднаннях внапусток

Концентрація напружень у зварних швах має місце не тільки при наявності дефектів в них (тріщини, не провари, пори тощо), але при повній їх наявності; власне шов є концентратором напружень.

Стикові шви являють собою найбільш досконалу форму, з точки зору розподілення в них силового потоку навантаження та мінімізації концентрації напружень, проте вона присутня у перерізі II, тобто на початку підсилення шва, в самому шві та по лінії сплавлення. Таким чином,

						Арк.
Змн.	Арк.					

зменшення висоти підсилення шва, плавне спряження підсилення з поверхнею деталей сприяють зменшенню концентрації напружень.

Теоретичне дослідження розподілу напружень у зварних швах та з'єднаннях доволі складне і коректне для простих випадків - обчислення напружень у зварному вузлі строгим шляхом є складною дослідницькою проблемою.

Вперше це явище було досліджено Г. Нейбером. В його роботах було досліджено концентрацію виступу (рис. 1.4.), що представляє собою підсилення зварного шва. Проблема може бути розглянута як плоска задача теорії пружності та розв'язана при деяких припущеннях.

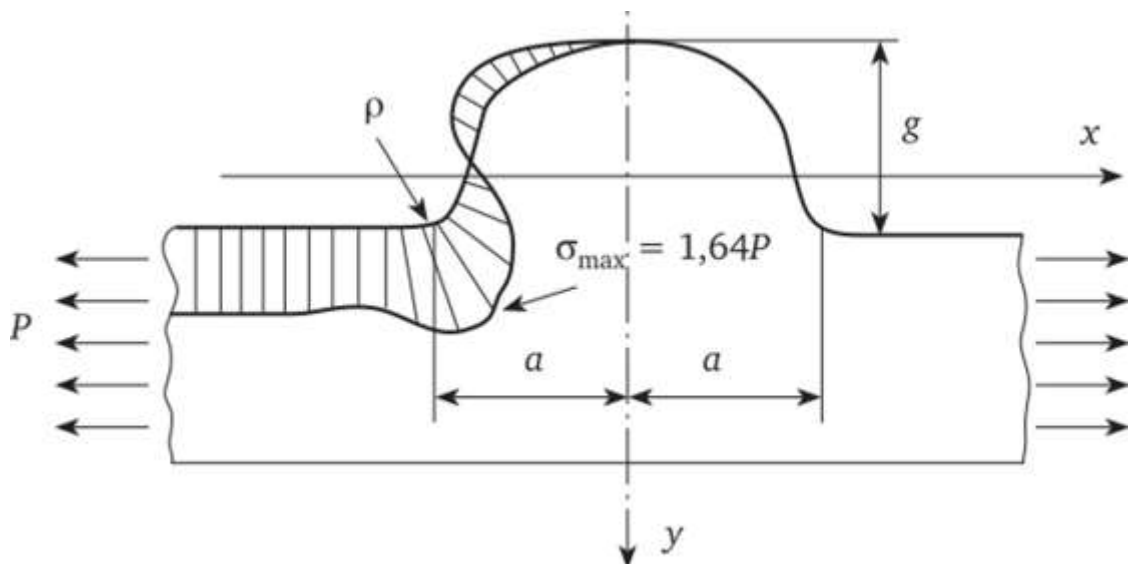


Рис. 1.4. Розрахункова схема зварного з'єднання для визначення концентрації напружень, що викликана зміною перерізу з'єднання

В дійсності форма стикового шва є складною і застосування методів теорії пружності ускладнене, тому для визначення коефіцієнтів концентрації напружень зварних з'єднань застосовують чисельні методи, поляризаційно-оптичний метод та тензовимірювання.

На практиці для спрощення розрахунків окрім теоретичного коефіцієнту концентрації користуються коефіцієнтом концентрації

						Арк.
Змн.	Арк.					

напружень в гарячій точці та коефіцієнтом концентрації, визначеним із застосування фіктивного закруглення осередку концентрації напружень.

Напруження в гарячій точці полягають у визначенні за допомогою МСЕ або експериментальних методів напружень у малій ділянці переходу від основного металу до металу шва, так званій «гарячій точці», де очікується початок руйнування.

Конструктивні напруження в гарячій точці (hot spot stress) σ_{hs} включають ефекти макроконцентрації, викликані особливостями геометрії та форми елементу конструкції (конструктивною неоднорідністю), проте виключають приріст напружень, обумовлений наявністю зварного шва. Конструктивні напруження залежать від розмірів елемента конструкції та параметрів його навантаження. Вони визначаються на поверхні біля гарячої точки, в якій перевіряється втомна міцність. Приклади конструктивної неоднорідності і розподіл напружень в таких конструктивних елементах представлені на рис. 1.5.

						Арк.
Змн.	Арк.					

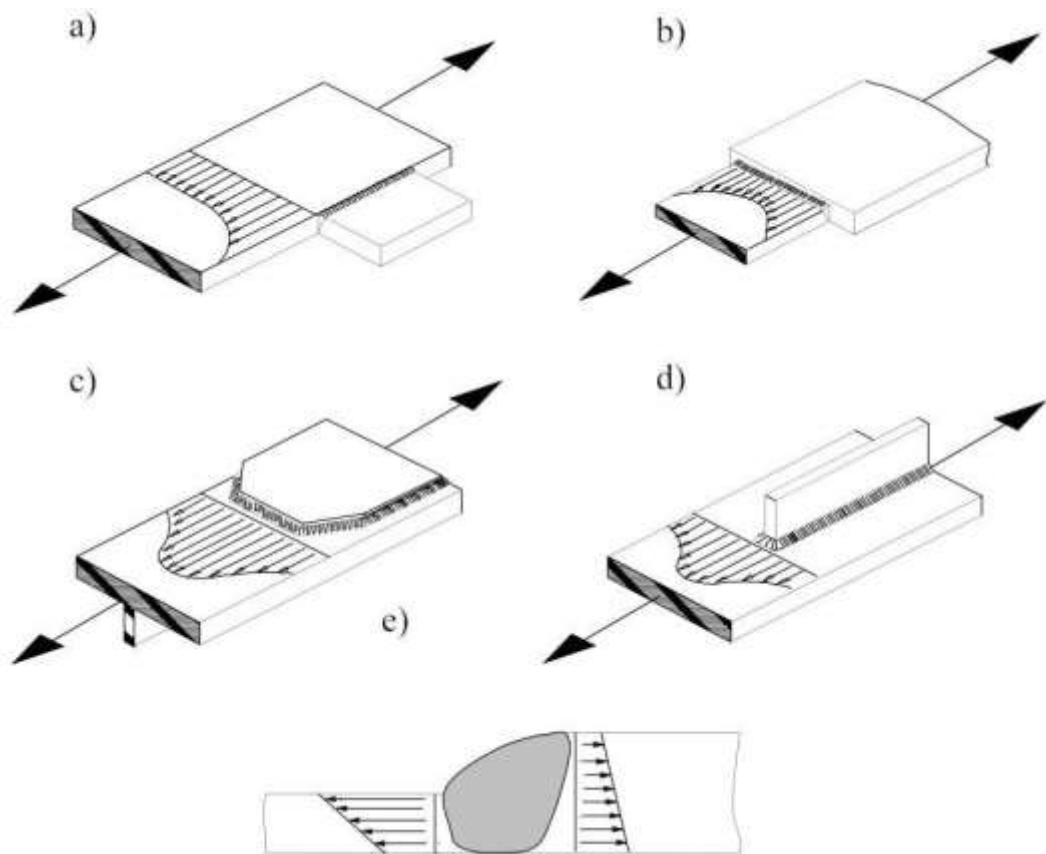


Рис. 1.5. Конструктивні елементи та конструктивні напруження

Конструктивні напруження в гарячій точці визначаються екстраполяцією із спеціальних точок, положення яких визначаються рекомендаціями Міжнародного інституту зварювання. Схема визначення такого напруження представлена на рис. 1.6.

						Арк.
Змн.	Арк.					

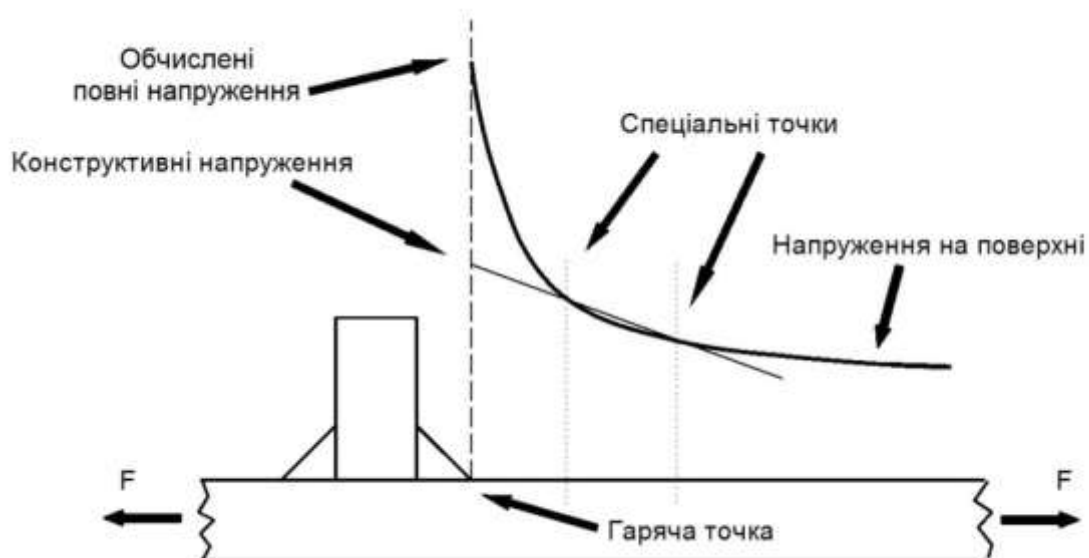


Рис. 1.6. Визначення конструктивних напружень в гарячій точці

Існують два типи гарячих точок в залежності від їх розташування та орієнтації по відношенню до «носку» шва, які представлені на рис. 1.7 та у табл. 1.1.

Табл. 1.1. Типи гарячих точок

Тип	Опис	Визначення
a	«Носок» шва на поверхні пластини	МСЕ або замірювання та екстраполяція
b	«Носок» шва на ребрі пластини	МСЕ або замірювання та екстраполяція

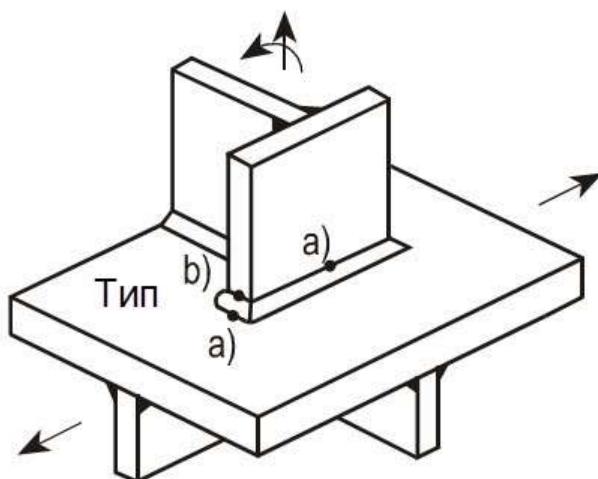


Рис. 1.7. Типи гарячих точок

						Арк.
Змн.	Арк.					

При розрахунку напружень в гарячій точці за допомогою СЕА комплексів, зварне з'єднання може моделюватись як елементами-пластинками (shell elements), при цьому шов не моделюється, так і тривимірними елементами (solid elements). У випадку використання тривимірних елементів можливо змодельовати форму наплавленого металу і врахувати таким чином його жорсткість. На рис. 1.8 представлені схеми побудови скінчено-елементних сіток та типові шляхи екстраполяції для визначення напруження в гарячій точці. У випадку, коли використовуються скінчені елементи-пластинки, рекомендуються знаходити напруження в гарячій точці екстраполяцією до точки перетину елементів для виключення недооцінки напружень через невраховану жорсткість наплавленого металу шва.

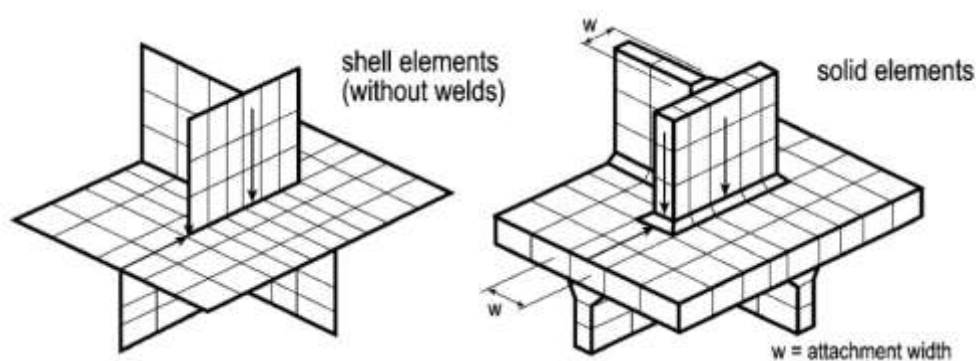


Рис. 1.8. Схеми скінченно-елементних моделей і типові шляхи оцінки напружень у гарячій точці

З розвитком обчислювальної техніки обмеження на кількість скінченних елементів при розрахунках були практично зняті, це дозволило детально моделювати геометрію елементу конструкції і форму наплавленого металу. Це зумовило можливість визначення місцевих напружень в осередку концентрації при закругленні останнього фіктивним радіусом $\rho = 1$ мм.

Ефективні локальні напруження можуть бути отримані за допомогою формул, діаграм або МСЕ. Вони розраховуються при припущенні про пружну поведінку матеріалу. Форма шва в дійсності змінюється вздовж його

						Арк.
Змн.	Арк.					

довжини, а при досягненні деякого рівня номінальних напружень поведінка матеріалу у осередках концентрації є нелінійною. У методі локального напруження дійсний контур шва замінюється ефективним, який є незмінним вздовж його довжини.

Для сталевих та алюмінієвих конструкцій, як показано на рис. 1.9, запропоновано моделювати потенціальні області початку руйнування округленими з радіусом 1 мм.

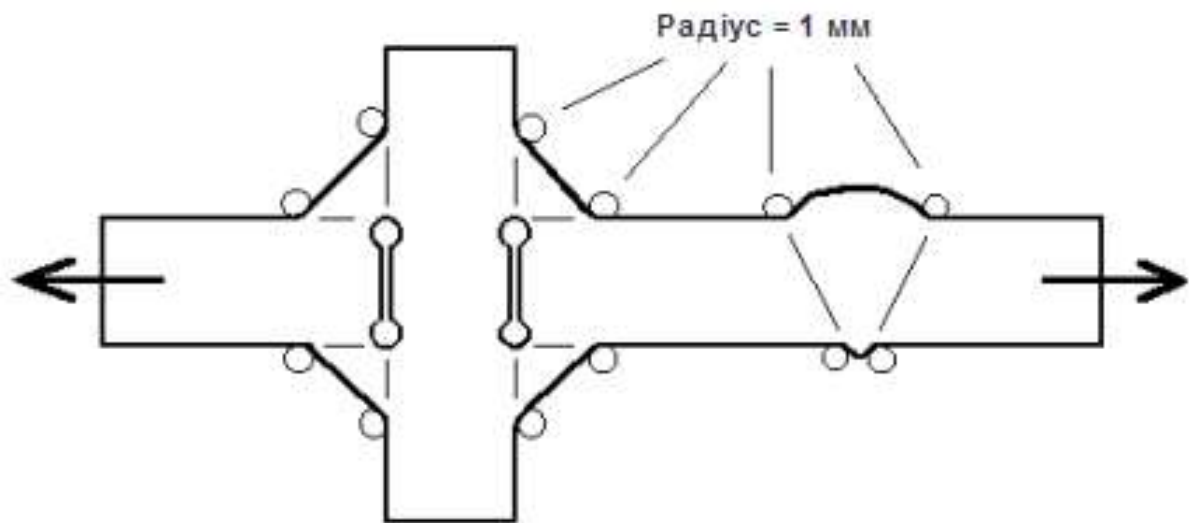


Рис. 1.9. Фіктивне округлення «носків» та коренів шва

При розробці СЕ-моделі необхідно розташувати у потенціальних місцях початку руйнування достатню кількість елементів, ця кількість залежить від типу скінченного елемента. Приблизно можна вважати що, розмір елемента вздовж контуру округлення повинен бути не більше 0,2 мм. Приклад СЕ-моделі зварного з'єднання для розрахунку за методом локального напруження представлений на рис. 1.10.

						Арк.
Змн.	Арк.					

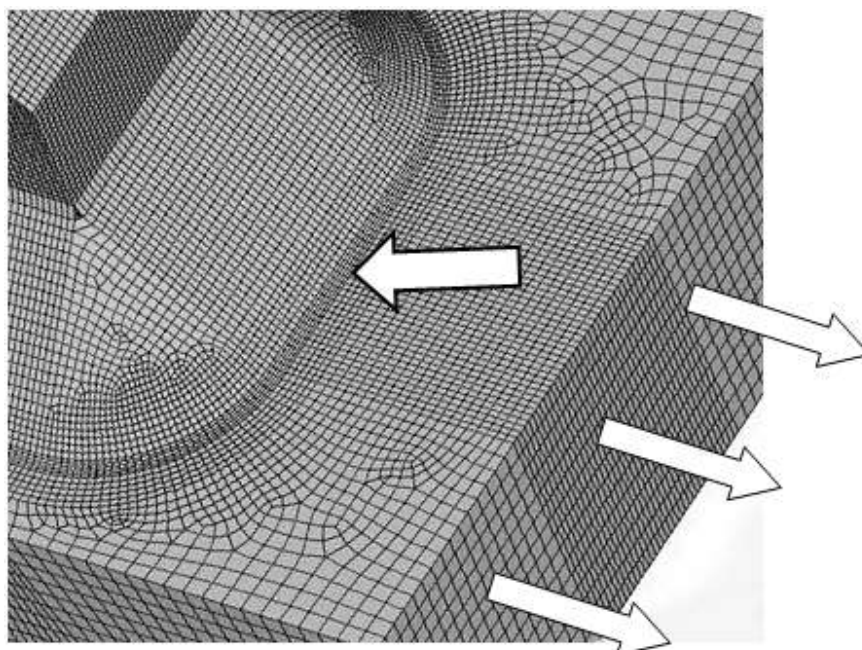


Рис. 1.10. SE-модель критичної області зварного з'єднання

При визначенні напружень у гарячій точці з розрахунку виключається ефект наявності зварного шва. В деяких випадках застосування такого підходу є доцільним.

В даній роботі для опису рівня концентрації напружень у вузлах прийнято застосовувати теоретичний коефіцієнт концентрації напружень. З його допомогою можна визначити ефективний коефіцієнт концентрації для розрахунку на втому зварних вузлів. До того ж, такий коефіцієнт не є ефективним, а має зрозуміле обґрунтування в механіці деформованого твердого тіла.

						Арк.
Змн.	Арк.					

1.2 Підходи до визначення значень теоретичного коефіцієнту концентрації

1.2.1. Визначення теоретичного коефіцієнту концентрації напружень у зварних з'єднаннях за допомогою тензовимірювання

Достатнє надійним способом визначення напружень та деформацій у зварних з'єднаннях є експериментальні методи – тензометрія певних ділянок зварного з'єднання та шва на масштабованих моделях (див. рис. 1.11-1.12).

Зони розташування тензорезисторів обираються відповідно поставленої задачі досліджень і для найбільш типового стикового з'єднання, де вивчається розподіл напружень як у самому шві, так й у зоні сплавлення та основному металі, також при наявності не провару кореню відповідають шва рис. 1.11.

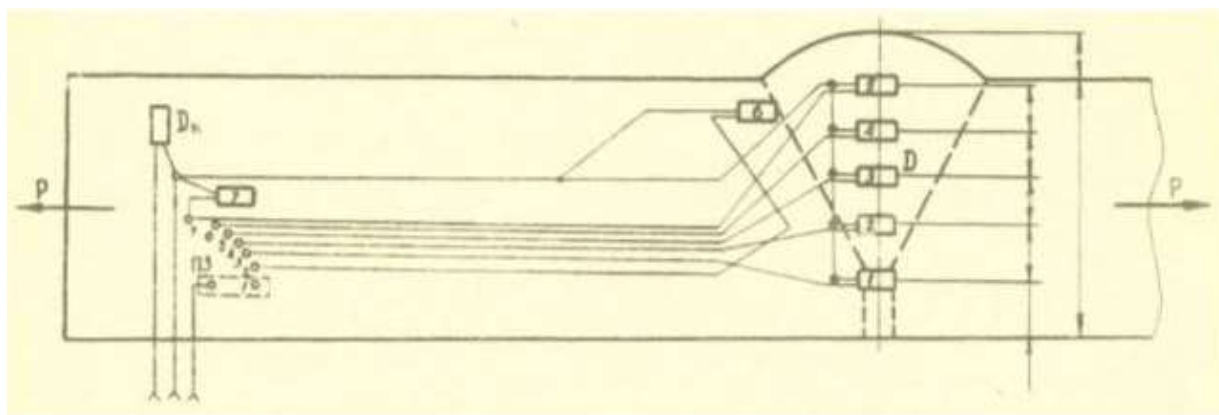


Рис. 1.11. Тензовимірювання деформацій та напружень у зварному шві

						Арк.
Змн.	Арк.					

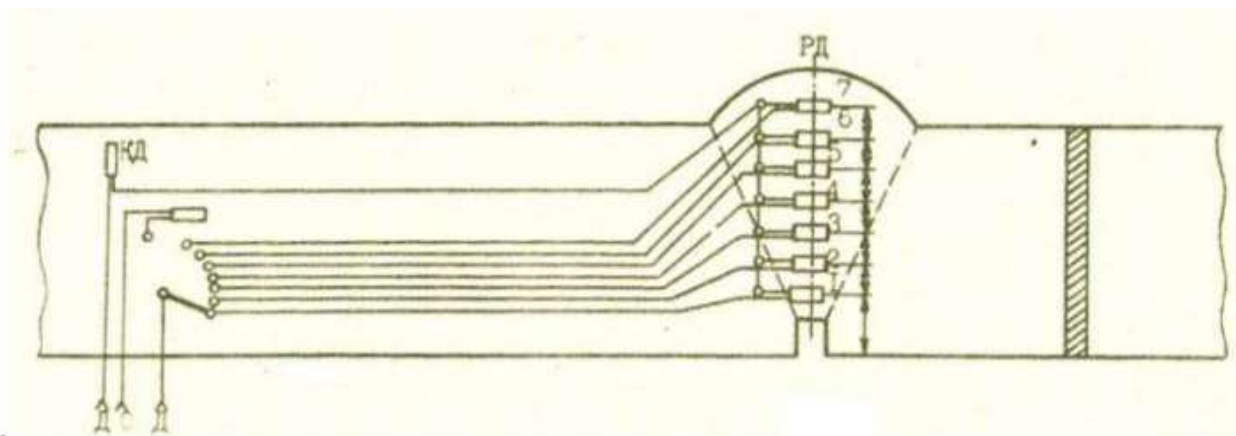


Рис. 1.12. Тензовимірювання деформацій та напружень у зварному шві

Фото і схема пристрою для вимірювання деформацій – тензодатчика, представлено на рис. 1.13 та 1.14.



Рис. 1.13. Фото типового тензодатчика

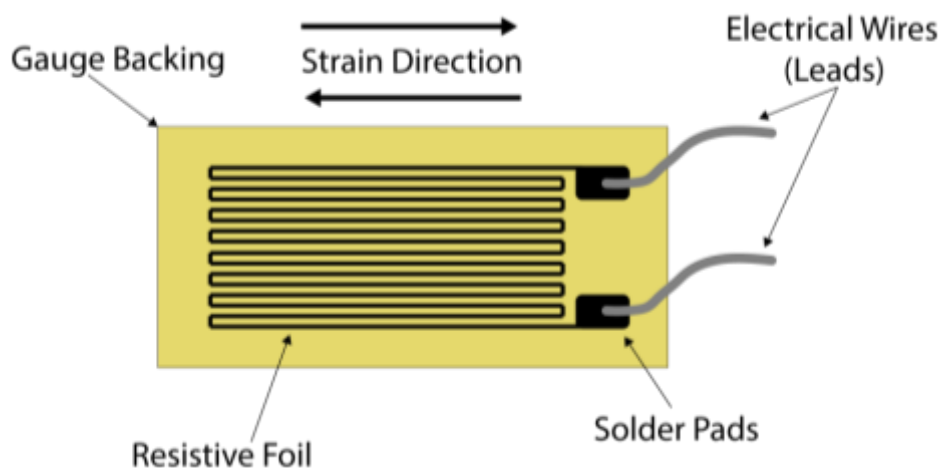


Рис. 1.14. Схема типового тензодатчика

						Арк.
Змн.	Арк.					

Як приклад, на рис. 1.15 наведена схема застосування тензодатчиків до визначення напружень у гарячій точці.

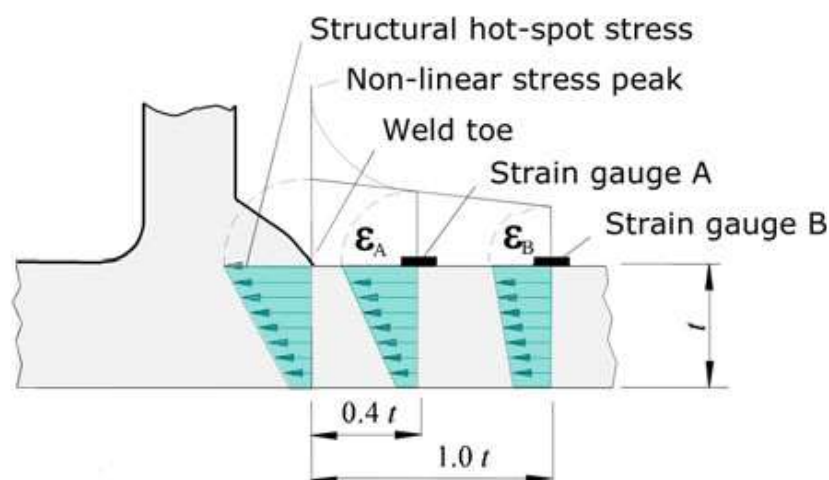


Рис. 1.15. Застосування тензодатчиків для визначення напружень у гарячій точці

1.2.2. Визначення теоретичного коефіцієнту концентрації напружень у зварних з'єднаннях поляризаційно-оптичним методом

Іншим способом визначення теоретичного коефіцієнта концентрації напружень, який широко застосовується декілька десятиліть тому, до поширення скінченно-елементного аналізу, є поляризаційно-оптичний метод.

У поляризаційно-оптичному методі використовується можливість відтворення у моделі, що виконана із прозорого, так званого оптично активного матеріалу, напруженого стану, подібного до напруженого стану натурального тіла, а також особливі оптичні властивості матеріалу, які отримує вказана модель при появі у ній поля напружень.

Застосування методу полягає у тому, що у диференціальні рівняння рівноваги частинок однозв'язного пружного тіла, з інтегрування яких можна визначити його НДС, не входять розміри тіла та пружні константи.

Відповідно, у двох геометрично подібних однозв'язних ідеально пружних тілах при однаковій інтенсивності навантаження в подібних точках

						Арк.
Змн.	Арк.					

будуть однаковими і напруження, незалежно від різності їх пружних констант.

Якщо для геометрично подібних моделей і реального тіла інтенсивність навантажень не однакова, але подібна, то залежності між навантаженнями та напруженнями у моделі та в натурному вигляді буде наступною:

$$k = \sigma_m / \sigma_n, \quad (1.1)$$

де k – коефіцієнт подібності; σ_m , σ_n – напруження в подібних точках моделі та натури.

Таким чином, для моделювання плоского напруженого стану однозв'язного тіла необхідно лише дотримання геометричної подібності моделі та натури й подібності їх навантаження.

Для багатозв'язних тіл виключити пружні константи матеріалу можливо лише тоді, коли навантаження на кожному із внутрішніх замкнутих контурів самоврівноважені.

Оптично активні матеріали, з яких виготовляють моделі, при появі в них поля напружень становляться оптично анізотропними з орієнтацією головних оптичних осей за напрямком головних напружень. Якщо у плоскій пластині визвати плоский напружений стан та просвітити пластину перпендикулярно її площині паралельними пучком плоскополяризованого світла, то в кожній точці пластини луч світла розщипиться на два луча, площини поляризації яких співпадають з напрямком головних напружень в даній точці. При проходженні товщини пластини обидва промені будуть мати різні швидкості. Як встановлено експериментально, різність швидкостей променів пропорційно алгебраїчній різності головних напружень. Внаслідок цього на виході з пластини вказані промені отримують відносний зсув за фазою, котрий також пропорційний до різності головних напружень в даній точці. Замірюючи різність фаз, наприклад, за допомогою інтерференції променів та знаючи їх коефіцієнт пропорційності, можна визначити різність головних напружень. В цьому полягає принципова основа методу.

						Арк.
Змн.	Арк.					

Для того, щоб просвічувати моделі можна застосовувати монохроматичне світло, тобто світло із визначеною довжиною хвилі, та біле світло, що представляє собою сукупність світлових променів з різною довжиною хвиль. Крім того, світло може бути плоскополяризованим або мати кругову поляризацію.

Приклад поляризаційно-оптичної установки із встановленим зразком представлено на рис. 1.6. Приклад застосування такої установки до визначення поля напружень у концентраторі представлено на рис. 1.7.

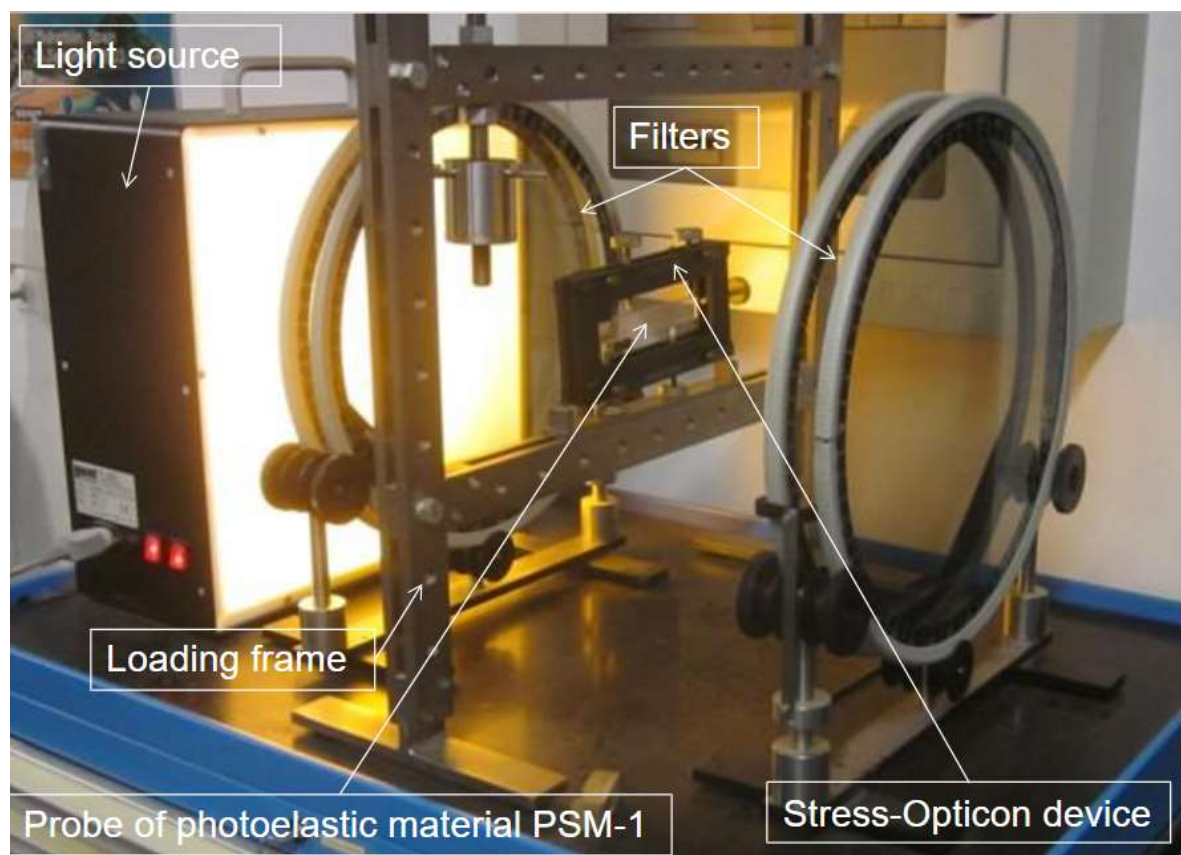


Рис. 1.16. Приклад поляризаційно-оптичної установки

									Арк.
Змн.	Арк.								

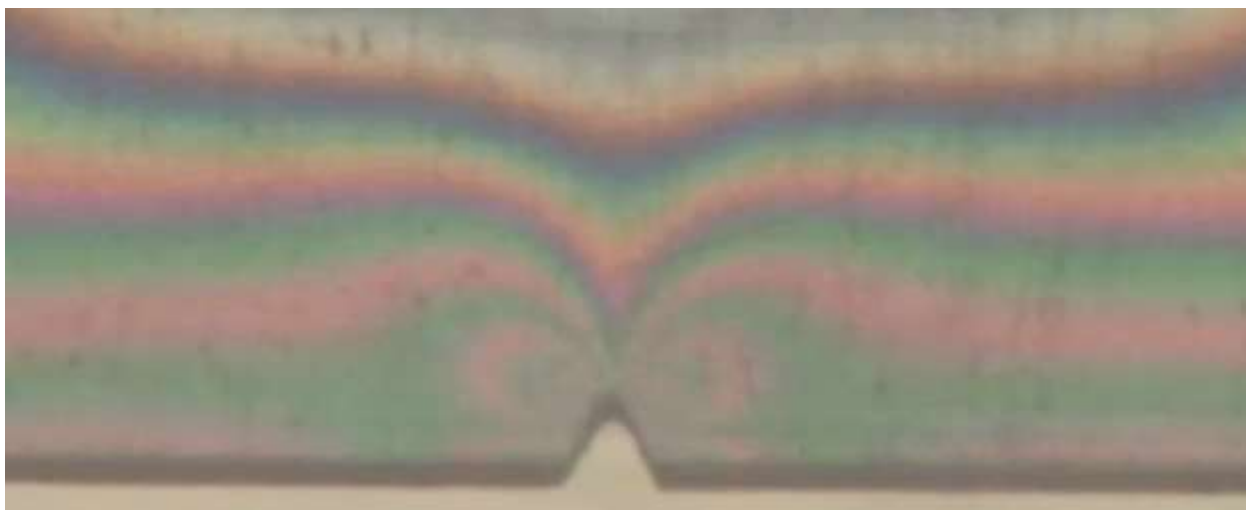


Рис. 1.17. Результат визначення розподілу напружень за допомогою поляризаційно-оптичної установки

1.2.3. Визначення теоретичного коефіцієнту концентрації напружень у зварних з'єднаннях за допомогою скінченно-елементного аналізу

Сучасним способом дослідження напружень у зварних конструктивних вузлах та інших концентраторах є скінченно-елементний аналіз. Скінченно-елементний аналіз широко застосовується при розв'язку задач механіки деформованого твердого тіла, гідро та газодинаміки.

На поточний час розроблено багато комерційних та безкоштовних систем скінченно-елементного аналізу, таких як ANSYS, Solidworks Simulation, Salome-Meca, тощо. З використанням таких систем можливо визначення розподілу напружень та деформацій в тілі без виготовлення самого зразка, на базі його цифрової моделі. Це значно спрощує внесення змін в геометрію виробу, а також значно зменшує витрати на його дослідження.

Приклад розподілу напружень в зварному з'єднанні, отриманий з використанням систем скінченно-елементного аналізу, наведений на рис. 1.18. В більшості випадків осередком концентрації напружень є місце переходу від металу шва до основного металу, як показано на рис. 1.19.

						Арк.
Змн.	Арк.					

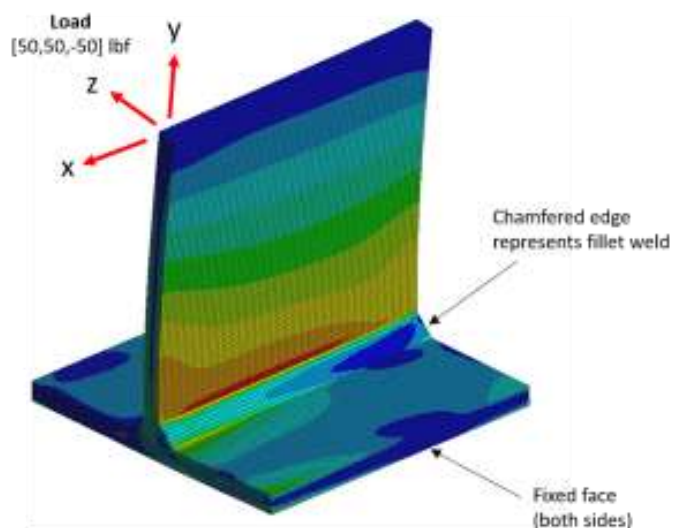


Рис. 1.18. Розподіл напружень в типовому зварному з'єднанні

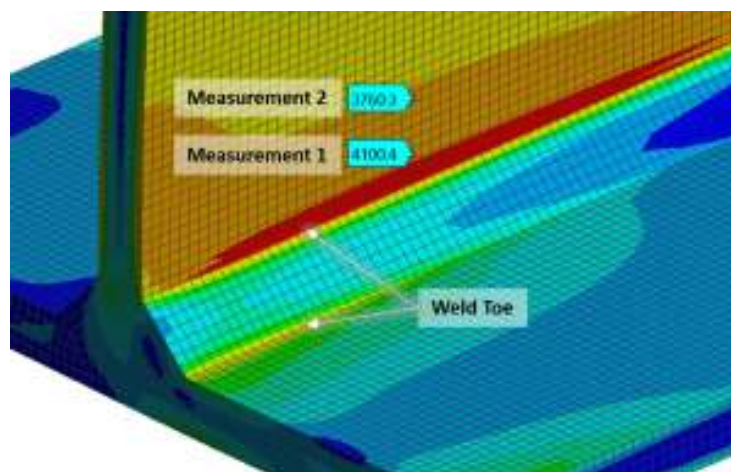


Рис. 1.19. Розподіл напружень в типовому зварному з'єднанні в околі зварного шва

З наведеного в поточному підрозділі можна встановити, що найбільш доцільно в магістерському дослідженні застосовувати скінченно-елементний аналіз для дослідження концентрації напружень у зварних швах.

Висновки із розділу 1

- Виконано аналіз проблеми концентрації напружень у зварних з'єднаннях та підходи до її вирішення. Прийнято використовувати для досліджень концентрації напружень у зварних з'єднаннях теоретичний коефіцієнт концентрації напружень.

						Арк.
Змн.	Арк.					

- Описано підходи до визначення напружень у зонах концентрації зварних з'єднань: тензовимірювання; поляризаційно-оптичний метод, скінченно-елементний аналіз. Через ряд переваг, включно відсутність потреби створювати експериментальні зразки, було обрано для застосування в дослідженнях скінченно-елементний аналіз.

						Арк.
Змн.	Арк.					

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.02			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Стислий опис методу скінченних елементів			Арк.
Студент		Чалюк Е.І.						
Керівник		Литвиненко Д. Ю.						
Зав. каф.		Коростильов Л. І.				НУК		

РОЗДІЛ 2

СТИСЛИЙ ОПИС МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

2.1 Основні положення методу скінченних елементів

Основним засобом дослідження концентрації напружень у зварних конструкціях в даній роботі є метод скінчених елементів на основі на ньому програмні комплекси.

Метод скінченних елементів (МСЕ) – це чисельний метод вирішення задач прикладної фізики. Ключова ідея методу при аналізі поведінки конструкцій полягає в наступному: суцільне середовище (конструкція в цілому) моделюється шляхом розбиття її на області (скінченні елементи), в кожній з яких поведінка середовища описується за допомогою окремого набору вибраних функцій, що представляють напруження і переміщення у вказаній області. Ці набори функцій часто задаються в такій формі, щоб задовольняти умовам неперервності описуваних ними характеристик у всьому середовищі.

Основні переваги МСЕ

- легка алгоритмізація при використанні обчислювальної техніки;
- просте формування систем лінійних рівнянь;
- можливість розрахунку неоднорідних і складних конструкцій за різних умов навантаження;
- широкий спектр розв'язуваних завдань.

Недоліки МСЕ:

- значний об'єм розрахунків;
- відсутність аналітичного розв'язку (необхідність повного розрахунку схеми для оцінки локального НДС);
- необхідність оцінки точності результатів розрахунку.

В період з 1850 по 1875 рр. завдяки зусиллям Максвелла, Кастільяно та Мора були вироблені основні концепції теорії аналізу стержневих

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	ПідписАкр	Дата		

конструкцій. Ці концепції є наріжним каменем матричних методів будівельної механіки, які остаточно оформилися лише через 80 років і у свою чергу стали основою методу скінченних елементів.

В кінці 50-х – на початку 60-х років з розвитком обчислювальної техніки в будівельній механіці сталася революція, пов'язана з відмовою від багаточисельних вузько орієнтованих прийомів розрахунку. Сталося перенесення центру тяжіння у фундаментальні дослідження методів механіки твердого тіла і математичної фізики, а в інженерній практиці – на прийоми і методи побудови комп'ютерних моделей.

Першою процедурою, яка була реалізована на ЕОМ того періоду, було вирішення систем лінійних рівнянь. Ця процедура, з одного боку, лежить в основі практично всіх чисельних методів, з іншого боку, порівняно проста в реалізації, хоч і пов'язана з великою кількістю обчислень.

Поява ЕОМ зумовила інтенсивну розробку чисельних методів, які, так або інакше, ґрунтувалися на трьох основних методах:

1. Метод сил – основний метод докомп'ютерної епохи, який охоплював можливості різних хитрувань з метою скорочення кількості обчислень (багаточисельні варіанти розрахункових схем, метод пружного центру і ін.). Незабаром з'ясувалося, що метод сил є неперспективним зважаючи на труднощі алгоритмізації побудови розрахункових схем, і надалі від нього довелося відмовитися.
2. Варіаційно-різницеві методи – розроблялися для вирішення задач розрахунку пластин і оболонок, ґрунтувалися на методах дискретизації функціоналу потенційної енергії (методи Рітца і Гальоркіна).
3. Метод переміщень – лежить в основі більшості сучасних програмних комплексів скінченно-елементного моделювання, його особливостями є дискретизація пластинчатих систем на основі стержневих апроксимацій та ітераційний (кроковий) метод для вирішення нелінійних задач.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	ПідписАкр	Дата		

Порядок створення розрахункової моделі. Розрахункова схема цікавить інженера не сама по собі, а в якості проміжної моделі для визначення напружено-деформованого стану конструкції, для оцінки інженером таких показників конструкції як її здатність бути зведеною, надійно експлуатованою, економічною. Тому, процес отримання результуючої інформації умовно можна розбити на чотири етапи:

- 1) перехід від реальної конструкції до механічної або математичної її моделі;
- 2) перехід від неперервної механіко-математичної моделі до дискретної моделі або розрахункової схеми, пристосованої до можливостей конкретного інструменту обчислень;
- 3) опис розрахункової схеми доступними засобами вибраного програмного забезпечення, проведення самого розрахунку та отримання чисельних результатів розрахунку;
- 4) інтерпретація та аналіз результатів розрахунку і отримання результуючої інформації.

Виділення з об'єкту є першим кроком ідеалізації. Після того, як вибрана та частина об'єкту, яка фігуруватиме в розрахунку, починається ідеалізація її геометричного образу – **геометричне моделювання**.

Моделювання приводить до створення деякої геометричної моделі конструкції, позбавленої неістотних (на думку розраховувача) деталей, наприклад, дрібних об'єктів типу фасок і скруглень, що не беруться до уваги..

Ідеалізація матеріалу конструкції, - вибір його фізико-механічних параметрів. Найчастіше матеріал наділяється властивостями ідеальної пружності або ідеальної пластичності. Значення параметрів, що характеризують властивості матеріалу (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, межа текучості та ін.) приймаються по довідкових даних і передбачаються однаковими в межах достатньо великих частин споруди або по всій споруді, і відповідність їх реальних значень прийнятим аналізується дуже рідко.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	ПідписАкр	Дата		

Ідеалізація навантажень, що діють на конструкцію в різних режимах роботи. Навантаження мають велику мінливість в часі і просторі, і ті розрахункові моделі, якими оперує проектна практика, досить умовні. Деякі з моделей навантаження, які традиційно використовуються при складанні розрахункових моделей (рівномірно розподілене навантаження, зосереджена сила, імпульсна дія, гармонічні коливання) є сильними фізичними абстракціями, про що треба добре пам'ятати при аналізі результатів розрахунку. Особливо багато помилок в процесі ідеалізації навантажень здійснюється в частині опису їх поведінки в часі, що приводить до недостовірної картини динамічної поведінки системи.

Часто необхідно описати не силову, а кінематичну взаємодію, коли деякі зовнішні по відношенню до розрахункової системи пристрої затруднюють переміщення або повороти окремих точок або нав'язують їм свої переміщення. Такі умови, названі **зв'язками**, майже завжди присутні в розрахунковій моделі. Звичайно, нескінченно жорсткий зв'язок, що задає системі певне (можливо, нульове) значення переміщення є ідеалізацією; насправді взаємодія з довкіллям реалізується через деякі пристрої, що мають дуже велику, але не нескінченно велику жорсткість.

Ідеалізація зв'язків поширюється і на опис законів взаємодії окремих елементів системи один з одним. Умови повного збігу переміщень або взаємних поворотів в точках з'єднання (абсолютно жорсткий зв'язок), так само як і відсутність якої б то не було взаємодії по даних видах переміщень (шарнір, повзунок), є досить сильною ідеалізацією реальної картини взаємодії.

Ідеалізація розрахункової моделі і неможливість зробити її абсолютно адекватною реальній конструкції створюють ситуацію деякої **невизначеності**, і саме в умовах такої невизначеності доводиться приймати проектні рішення. Наближеність майже всіх параметрів моделі, що задаються, пов'язані з реально існуючими допусками на розміри, вагу та інші вимірювані величини.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	Підпис	Акр.		

Більшість програмних комплексів, що базуються на застосування МСЕ, складаються з графічного

Графічне середовище надає користувачеві можливість швидко і наочно створювати розрахункові схеми із знайомих базових об'єктів – стержнів, ферм, рам, пластин, оболонок, об'ємних тіл. Отримана конструкція відображується на екрані у вигляді реального просторового зображення. Його можна повертати, масштабувати, виділяти фрагменти, копіювати або переносити їх, збирати з окремих фрагментів складні розрахункові схеми. При цьому користувач працює з графічними образами об'єктів, природним для себе чином створюючи або редагуючи споруду або конструкцію.

Розрахунковий процесор реалізує сучасні методи складання та вирішення систем рівнянь МСЕ, що володіють високою швидкістю і дозволяють вирішувати системи з дуже великим числом невідомих. При цьому можливі задання лінійних і нелінійних законів деформації матеріалів, врахування геометричної нелінійності. Реалізовані закони деформації різних класів залізобетону. При розрахунках нелінійних завдань проводиться автоматичний вибір кроку навантаження з врахуванням його історії. Можливості процесора дозволяють змодельовати поведінку споруди в процесі зведення при багатократній зміні розрахункової схеми.

Постпроцесор представляє результати розрахунку у зручній для користувача формі. Наприклад, розподіл механічних напружень або температур в моделі часто показують зміною кольору (розфарбовуванням). При цьому мінімальне значення величини зазвичай відповідає фіолетовому кольору, а максимальне – червоному. Аналогічно можуть бути виведені на екран деформації.

У МСЕ стан деформованого тіла характеризується скінченним числом незалежних параметрів, які є визначеними у вузлах скінчено-елементної моделі, дані параметри називають ступенями вільності. В якості ступенів вільності приймають переміщення вузлів. У МСЕ використовуються загальна система координат (глобальна) та місцеві (локальні). Останні пов'язані з

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	ПідписАкр	Дата		

конкретними скінченими елементами. Набору усіх ступенів вільності відповідає глобальний вектор вузлових переміщень моделі, представлений нижче

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_q \\ \dots \\ u_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{U}_1 \\ \dots \\ \bar{U}_i \\ \dots \\ \bar{U}_n \end{Bmatrix} = 1, \quad (2.1)$$

де u_q – величина переміщення у вузлі номер q (N – загальне число ступенів вільності всієї моделі); $\bar{U}_i$ – підвектор, складений з усіх компонентів переміщення вузла номер i (n – загальне число вузлів у моделі).

Шукана функція – поле переміщень точок деформованого тіла апроксимується за допомогою багатьох кусково-неперервних функцій, що називаються функціями форми. Такі апроксимуючі функції дозволяють інтерполювати вектор переміщень довільної точки елемента $\{U(\bar{X})\}_e$ через вектор вузлових переміщень елемента $\{U\}_e$ у вигляді сум

$$\{U(\bar{X})\}_e = [N_\Phi(\bar{X})]_e \{U\}_e, \quad (2.2)$$

де $\bar{X}$ – набір координат, що визначають положення точки в елементі; $[N_\Phi(\bar{X})]_e$ – матриця функцій форми елемента.

Передбачається, що скінченні елементи взаємодіють тільки через спільні вузли. Внутрішні зусилля, що діють на елементи, замінюються статично або енергетично еквівалентними вузловими силами, що складають вектор вузлових зусиль елемента. Зовнішні розподілені масові та поверхневі сили, що діють на скінчений елемент також приводяться до статично або енергетично еквівалентних вузлових зусиль. До еквівалентних вузлових сил приводяться також сили інерції та початкові деформації.

Матричне рівняння жорсткості скінченого елемента в загальній формі та глобальна система рівнянь рівноваги всієї скінченно-елементної моделі досліджуваного деформованого тіла для задач статки мають наступний вигляд:

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	Підпис Арк	Дата		

$$[K]_e \{U\}_e = \{P\}_e + \{P\}_e^q + \{P\}_e^g, \quad (2.3)$$

$$[K]\{U\} = \{P\} + \{P\}^q + \{P\}^g, \quad (2.4)$$

де $[K]_e$, $[K]$ – матриці жорсткості елемента та скінченно-елементної моделі, перша складається з коефіцієнтів жорсткості, а компоненти другої обчислюються шляхом підсумовування відповідних коефіцієнтів жорсткості скінчених елементів; $\{P\}_e$, $\{P\}$ – вектори вузових зусиль елемента та усієї моделі; $\{P\}_e^q$, $\{P\}^q$ – приведені до еквівалентних векторів вузових зусиль зовнішні поверхневі сили для скінченого елемента та для всієї моделі, відповідно; $\{P\}_e^g$, $\{P\}^g$ – аналогічні до попередніх вектори приведених зовнішніх масових сил.

Граничні умови в переміщеннях можуть враховуватись як при формуванні матриць елементів, так і після складання загальних матриць моделі. Для врахування граничних умов у статичних задачах часто використовується підхід, при якому задані переміщення (для закріплень – нульові переміщення) враховуються шляхом перетворення матриць $[K]$ та $\{P\}$, без зміни розмірності матриць загальної системи рівнянь рівноваги. За іншим підходом передбачається пониження числа ступенів вільності моделі, в результаті чого змінюється розмірність вказаних матриць загальної системи рівнянь рівноваги.

Розв'язок системи рівнянь (2.4) виконується за допомогою прямих або ітераційних методів. Після знаходження глобального вектору вузових переміщень $\{U\}$ визначають вектори вузових переміщень для скінчених елементів $\{U\}_e$. З використанням останніх та функцій форми обчислюється поле переміщень для будь-якого елемента. На базі визначеного поля переміщень можна визначити поле деформацій та напружень.

Для розрахунку зварних вузлів можливе використання плоских двовимірних елементів при незмінній геометрії вузла вздовж зварного шва або тривимірних об'ємних елементів у протилежному випадку.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	ПідписАкр	Дата		

Для апроксимації переміщень в межах елементів (функції форми) при розрахунках напружено-деформованого стану за допомогою розрахункових комплексів використовуються в основному лінійні або квадратичні функції координат.

Плоскі елементи, представлені в розрахункових комплексах, мають форму трикутників або чотирикутників з вузовими точками у вершинах кутів та в середині сторін, або тільки у вершинах. Останні є елементами першого порядку з лінійною апроксимацією переміщень в межах скінченного елемента. У випадку вузових точок в середині сторін та у вершинах елементи мають другий порядок.

Об'ємні тривимірні скінченні елементи, що представлені в розрахункових комплексах, мають форму тетраедрів або шестигранників, першого або другого порядку, аналогічно до плоских.

2.2 Програмні комплекси скінченно-елементного аналізу

Як вже зазначалось раніше, програмні комплекси скінченно-елементного аналізу дозволяють виконувати комп'ютерне тестування виробів, таким чином можна виключити з проектування етап створення прототипу. На рис. 2.1 показано порівняння традиційного процесу проектування із сучасним, за допомогою CAD/CAE систем.

Процес інженерного аналізу зазвичай поділяють на 3 стадії: препроцесінг, процесінг або розв'язання та постпроцесінг, як показано на рис. 2.2.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	ПідписАкр	Дата		

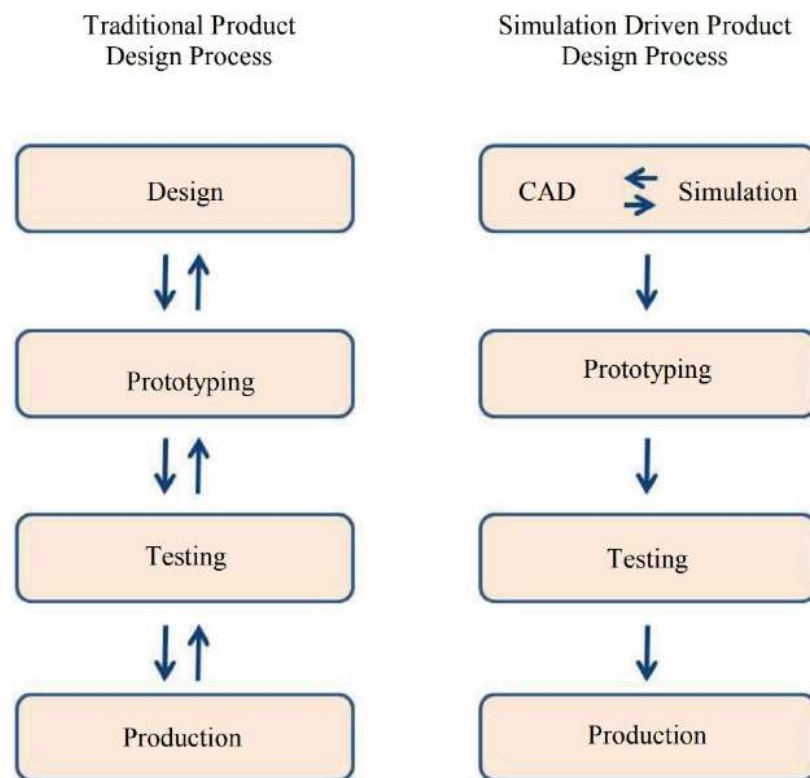
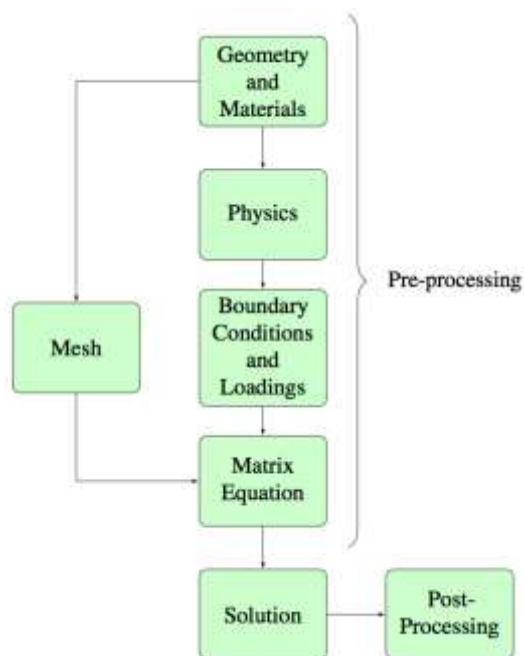


Рис. 2.1. Порівняння традиційного процесу проектування із сучасним, за допомогою CAD/CAE систем



2.2. Три стадії процесу інженерного аналізу

Препроцесінг – це підготовка моделі до скінченно-елементного аналізу.

Вона включає наступні кроки:

1. Вибір типу скінченного елемента та налаштування його опцій
2. Визначення геометричних характеристик перерізу скінченного елемента
3. Визначення матеріалу та його властивостей
4. Побудова або імпортування геометричної моделі конструкції або деталі
5. Дискретизація геометричної моделі на скінченні елементи
6. Накладання граничних умов

Процесінг (розв'язок) включає наступні кроки:

1. Вибір типу аналізу та налаштування його опцій
2. Запуск розв'язку

Постпроцесінг передбачає перегляд результатів розв'язку у вигляді таблиць, графіків, ізоліній, анімацій, тощо.

Серед найбільш популярних програмних комплексів скінченно-елементного аналізу можна виділити наступні:

- ANSYS;
- Solidworks Simulation;
- NX Nastran;
- Salome-Meca.

Перші три з перелічених програмних комплексів є комерційними, останній є некомерційним.

Висновки із розділу 2

- Наведено опис історичного розвитку обчислювальних методів розрахунку міцності
- Представлені базові розрахункові залежності методу скінченних елементів

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	Підпис	Акр		

- Наведено стислий опис програмних комплексів для скінченно-елементного аналізу

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./Літ.	Підпис	Акр		



					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.03			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Аналіз наближених формул для розрахунку коефіцієнтів концентрації стикових швів			Арк.
Студент		Чалюк Є.І.						
Керівник		Литвиненко Д. Ю.						
Зав. каф.		Коростильов Л. І.				НУК		

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ НАБЛИЖЕНИХ ФОРМУЛ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТІВ КОНЦЕНТРАЦІЇ СТИКОВИХ ШВІВ

3.1 Наближені формули для розрахунку коефіцієнтів концентрації напружень у зварних стикових швах

В літературі наведено ряд наближених формул для розрахунку теоретичних коефіцієнтів концентрації у зварних стикових швах. Такі формули апроксимують розрахункові результати, отримані на базі розрахунків методом скінчених елементів, а також результати застосування поляризаційно-оптичного методу та тензовимірювань на моделях зразків.

Для розрахунку коефіцієнта K_t стикових зварних з'єднань з повним проплавленням, Х-подібною розробкою кромek та кутом розхилу останніх 90 градусів в роботах представлена формула Лоуренса, яка має такий вигляд:

$$K_t = 1 + \alpha \cdot \left(\frac{s_{\text{л}}}{\rho} \right)^{0,5} \quad (3.1)$$

де α – коефіцієнт, що залежить від величини кута нахилу профілю шва Θ у місці переходу від основного металу до металу шва; $s_{\text{л}}$ – товщина листів, що з'єднуються.

Інший варіант формули (3.1):

$$K_t = 1 + 0,27 \cdot \tan(\theta)^{0,25} \cdot \left(\frac{s_{\text{л}}}{\rho} \right)^{0,5} \quad (3.2)$$

Для стикових зварних швів з Х-подібною розробкою кромek, може бути застосована наступна формула:

$$K_t = 1 + \alpha' \cdot \sin(\theta)^{\lambda_1} \cdot \left(\frac{s_{\text{л}}}{\rho} \right)^{\lambda_2} \quad (3.3)$$

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	ПідписАкр	Дата		

де коефіцієнт α' дорівнює 0,728 при дії навантаження розтягу; показник ступеня $\lambda_1 = 0,932$ та $\lambda_2 = 0,382$ при такому ж навантаженні

Варіанти залежностей для визначення теоретичних коефіцієнтів концентрації стикових зварних швів, що містять величини ширини шва та висоти підсилення $g_{\text{шв}}$ та $e_{\text{шв}}$:

$$K_t = 1 + \frac{1 - e_{\text{шв}}^{-0,9 \cdot \theta \cdot \sqrt{\frac{s_{\text{л}}}{2 \cdot g_{\text{шв}}} + 1}}}{1 - e_{\text{шв}}^{-0,45 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{s_{\text{л}}}{2 \cdot g_{\text{шв}}} + 1}}} \cdot \left[\frac{1}{2,8 \cdot \left(2 \cdot \frac{g_{\text{шв}}}{s_{\text{л}}} + 1 \right) - 2} \cdot \frac{g_{\text{шв}}}{\rho} \right]^{0,65}, \quad (3.4)$$

$$K_t = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{\rho}{g_{\text{шв}}} \cdot \text{ctg}\left(\frac{\theta}{2}\right) + 4 \cdot \frac{\rho}{s_{\text{л}}} + 5 \cdot \frac{\rho}{e_{\text{шв}} + \rho} \right)^2}} + 1. \quad (3.5)$$

Наближена залежність (3.4) може застосовуватись для стикових зварних з'єднань із: $\rho/s_{\text{л}} = 0,05 \dots 0,1$; $g_{\text{шв}}/s_{\text{л}} = 0,2 \dots 0,25$; $\theta = 30 \dots 45$ град; $e_{\text{шв}}/s_{\text{л}} = 1 \dots 2,3$. Формула (3.5) - для стикових зварних з'єднань з: $\rho/s_{\text{л}} = 0,01 \dots 0,1$; $g_{\text{шв}}/s_{\text{л}} = 0,1 \dots 0,2$; $\theta = 15^\circ \dots 30^\circ$; $e_{\text{шв}}/s_{\text{л}} = 0,1 \dots 2,3$.

3.2 Порівняльний аналіз наближених формул для розрахунку коефіцієнтів концентрації напружень у зварних стикових швах із розрахунками методом скінченних елементів

Для вибору найбільш раціональної формули з (3.1) - (3.5) виконувався порівняльний аналіз розрахунків величини теоретичного коефіцієнту концентрації напружень стикових зварних швів за наведеними в 3.1 формулами та за розрахунком скінченно-елементним аналізом.

При розробці геометричних 2-D моделей стикових зварних швів (див. рис. 3.1) були використані рекомендації International Institute of Welding (IIW). Схематичне зображення профілю стикового зварного шва відповідно до IIW наведено на рис. 3.2.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	Підпис/Арк	Дата		

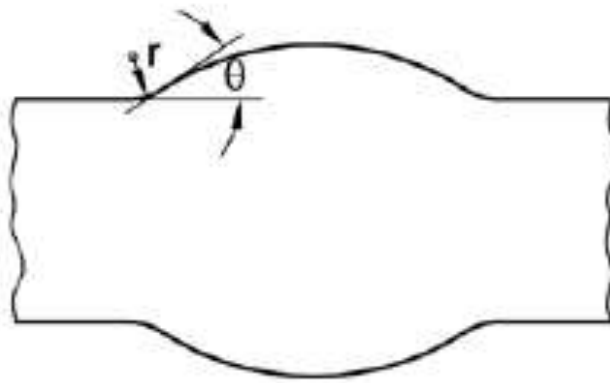


Рис. 3.1. Схематичне зображення стикового зварного шва

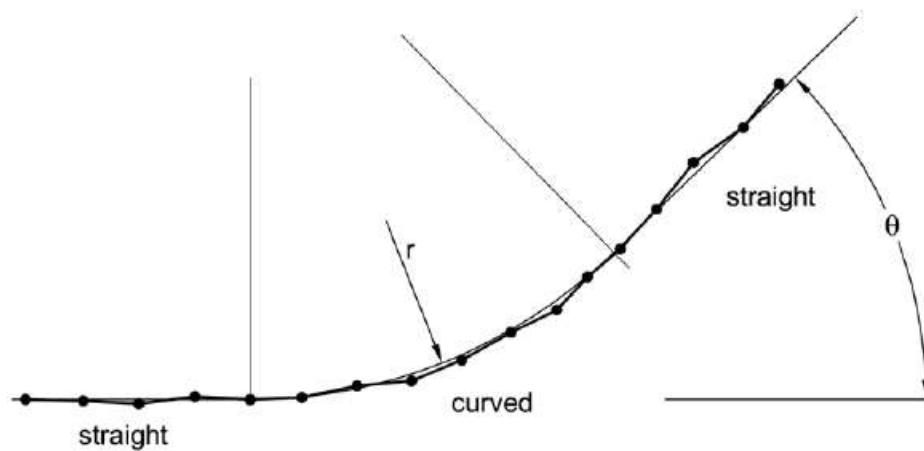


Рис. 3.2. Схематичне зображення стикового зварного шва відповідно до рекомендацій IIW

Геометричні 2-D моделі, у яких виконувався розрахунок напружень, розроблялись за допомогою FreeCAD. Місце переходу від металу шва до основного металу створювалось сплайнами або дугами. Приклад геометричної моделі стикового шва представлено на рис. 3.3.

					19.MP.135.6116м.12.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	ПідписАкр	Дата		

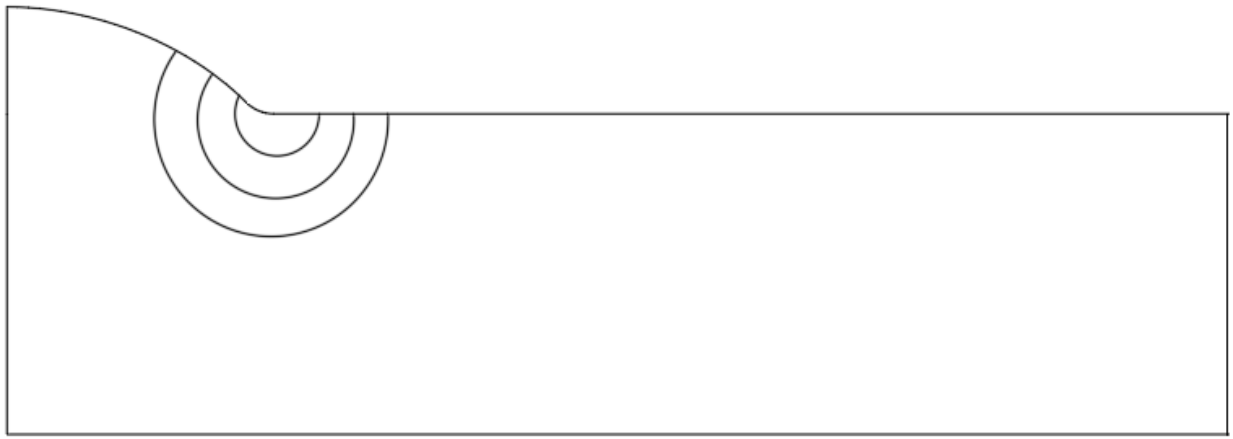


Рис. 3.3. Геометрична модель стикового шва

Для побудови плавної сітки в околі концентратора напружень виділялось декілька зон, як показано на рис. 3.4.

Розбивка на скінченні елементи виконувалась відповідно до рекомендацій ІІW. Розмір ребра елемента в районі місця переходу становив $\rho/4$ мм.

Приклади скінченно-елементної сітки в районі осередку концентрації напружень стикового зварного шва для двох значень радіусів переходу ρ представлені на рис. 3.4, 3.5.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	ПідписАкр	Дата		

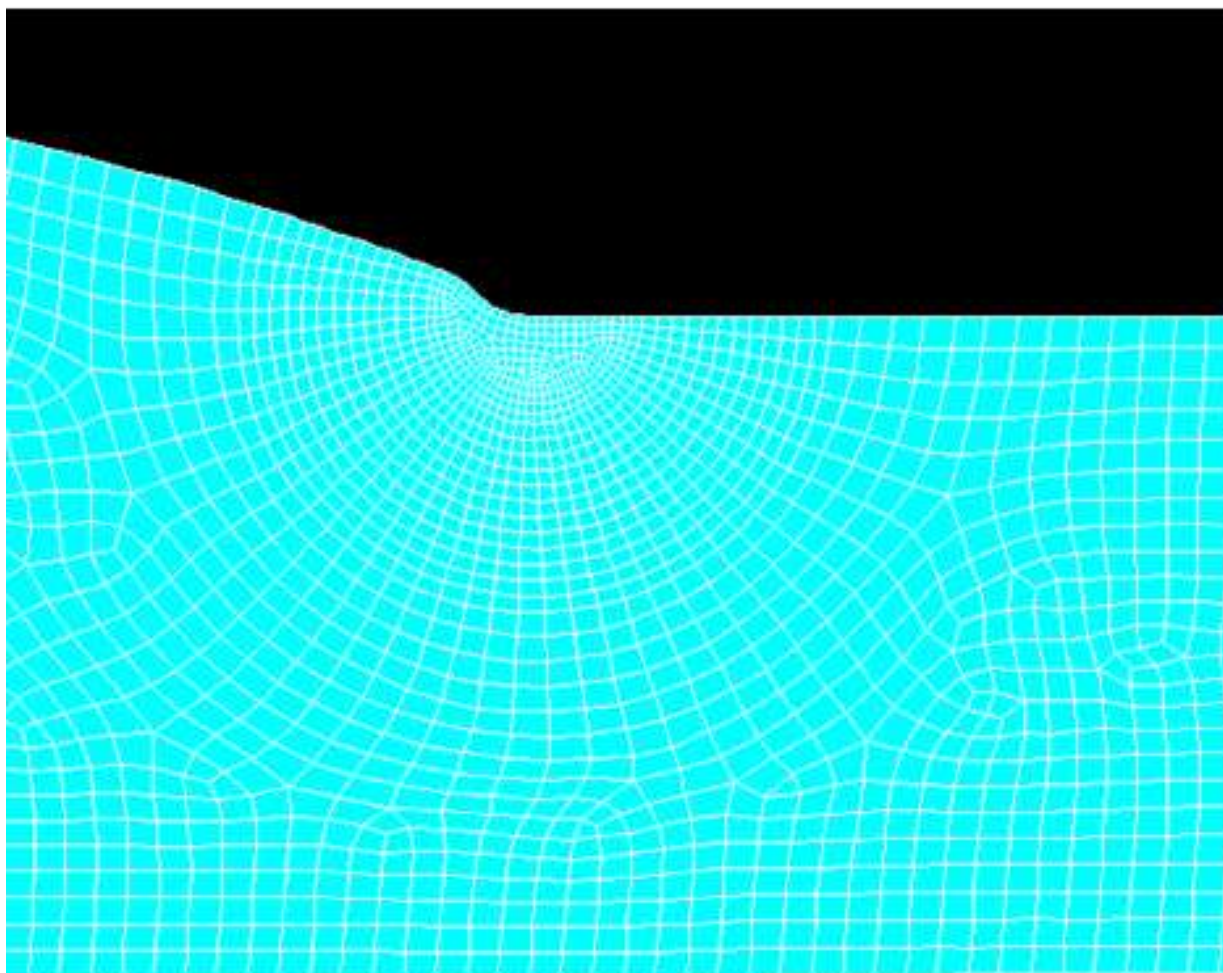


Рис. 3.4. Скінченно-елементна сітка в районі концентратора напружень

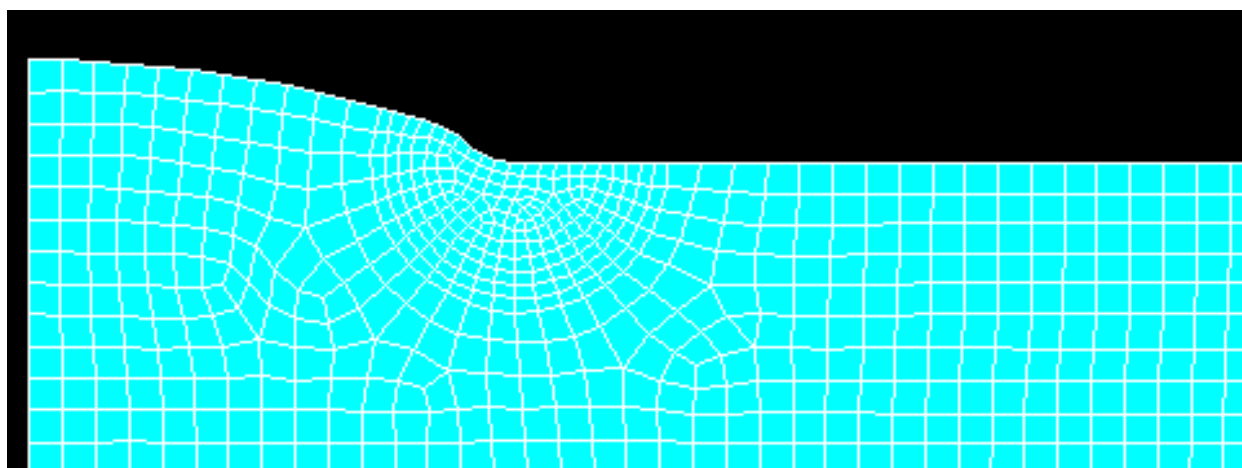


Рис. 3.5. Скінченно-елементна сітка стикового зварного шва

Приклад епюри розподілу еквівалентних напружень в такому стиковому шві представлено на рис. 3.6. Для розрахунків використовувались плоскі елементи.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	ПідписАкр	Дата		

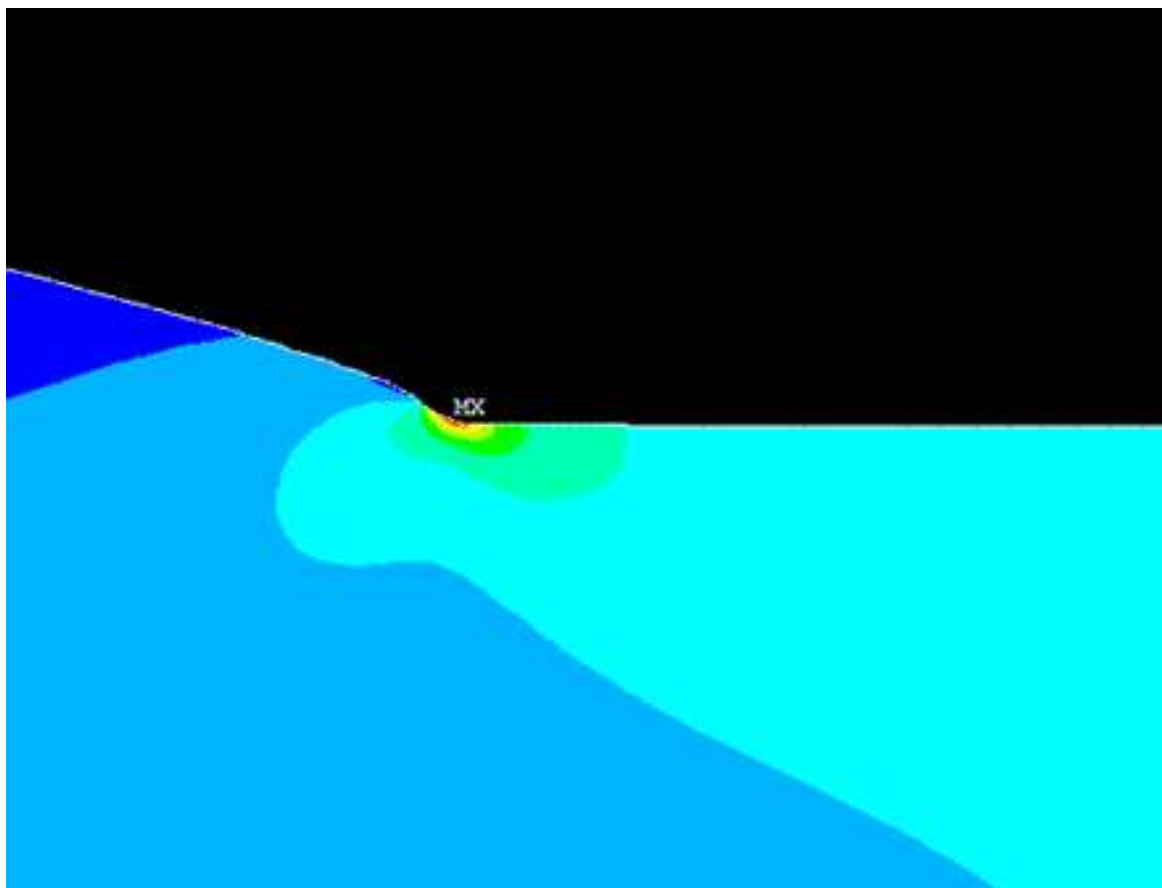


Рис. 3.6. Приклад епюри напружень в місці переходу від основного металу до металу шва стикового зварного з'єднання

Порівняння різних варіантів наближених залежностей для визначення коефіцієнту K_t у стикових зварних з'єднаннях показано в табл. 3.1. Товщина листів s_L , що з'єднувались приймались типовими для суднокорпусних конструкцій. Інші розмірні параметри приймались за ДСТУ EN ISO 9692-1:2014. Величини ρ/s_L та Θ приймались типовими з діапазону справедливості формул (3.4) та (3.5).

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	ПідписАкр	Дата		

Таблиця 3.1 – Результати розрахунків коефіцієнтів концентрації напружень стикових з'єднань за допомогою наближених залежностей та скінченно-елементного аналізу

S_L , мм	ρ/S_L	$g_{шв}/S_L$	$e_{шв}/S_L$	Θ , град	Розраховані значення K_t					
					МСЕ	(3.1)	(3.2)	(3.3)	(3.4)	(3.5)
12	0,015	0,17	1,42	45	3,44	3,20	3,20	3,62	3,68	3,09
16	0,062	0,13	0,88	17	1,89	1,75	1,81	1,67	1,57	1,41
12	0,043	0,08	1,58	45	2,15	2,30	2,30	2,75	2,14	1,75
12	0,043	0,17	1,58	45	2,44	2,30	2,30	2,75	2,36	2,05
12	0,059	0,17	1,58	45	2,32	2,11	2,11	2,55	2,10	1,85
12	0,015	0,17	0,83	45	3,45	3,20	3,20	3,62	3,68	2,95
12	0,043	0,17	0,83	45	2,50	2,30	2,30	2,75	2,36	1,97
12	0,059	0,17	0,83	45	2,28	2,11	2,11	2,55	2,10	1,79

Як видно з табл. 3.1, найбільш близькі оцінки коефіцієнту концентрації напружень до скінченно-елементного аналізу можна отримати за допомогою формул (3.2), (3.3), (3.4), (3.5).

На етапі розробки проекту судна тип зварювання та параметри зварних швів можуть бути невідомі. Тому доцільніше використовувати залежності для визначення K_t , що не містять усіх розмірних параметрів шва.

Величина K_w , розрахована за формулами (3.2), (3.3), (3.4) залежить тільки від товщини досліджуваного з'єднання, радіусу ρ та кута Θ в місці переходу від основного металу до металу шва.

Формула (3.2) потребує операцію інтерполяції для розрахунку α . З використанням формули (3.4) були отримані близькі (головним чином в бік завищення) результати до результатів розрахунків скінченно-елементним аналізом.

Таким чином, найбільш доцільно використовувати для розрахунку теоретичного коефіцієнту концентрації напружень зварних стикових швів формули (3.3) та (3.4). Використання (3.3) дозволяє отримати результати з невеликим відхиленням «в бік зменшення» від результатів розрахунку на базі

методу скінченних елементів, а застосування формули (3.4) – «в бік збільшення».

Усі наведені значення коефіцієнтів концентрації напружень визначались на підставі зведених напружень за четвертою (енергетичною) теорією міцності.

Висновки із розділу 3

- Виконано аналіз наближених формул для розрахунку значень теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень у зварних стикових швах.
- Виконано порівняльний аналіз результатів застосування зазначених формул та скінченно-елементного аналізу для визначення теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень у зварних стикових швах. В результаті рекомендовано застосування формули Лоуренса.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./Літ.	Підпис	Акр		



					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.04			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Наближена визначення коefficientів концентрації зварних вузлів	№	Арк.	Підпис
Студент		Чалюк Е. І.						Акрушів
Керівник		Литвиненко Д. Ю.						Дата
Зав. каф.		Коростильов Л. І.				НУК		

РОЗДІЛ 4

НАБЛИЖЕНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЗВАРНИХ ВУЗЛІВ

4.1. Дослідження концентрації напружень у хрестоподібному з'єднанні

Розрахунок теоретичного коефіцієнта концентрації напружень конструктивних вузлів у суднобудуванні є необхідним з ряду причин:

- для порівняльного аналізу різних конструктивних варіантів вузла;
- для оцінки втомної міцності конструктивних вузлів.

Створення детальної комп'ютерної моделі зварного вузла є достатньо трудомісткою процедурою. Особливо трудомісткими є 3-вимірні моделі, подібні до реального вузла з моделюванням зварного шва і його місцевої геометрії в місці переходу від основного металу до металу шва.

Створення скінченно-елементної сітки в таких 3-вимірних моделях із складною місцевою геометрією також буде трудомістким. Розрахунок таких моделей в системах скінченно-елементного аналізу потребує значних ресурсів та машинного часу.

Через зазначені причини для експрес-оцінки теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень зварних вузлів корпусу судна будь-якої конструкції потрібно застосовувати наближені залежності.

В літературних джерелах запропоновано визначати теоретичний коефіцієнт концентрації зварних вузлів добутком коефіцієнтів концентрації напружень від наявності зварного шва K_w та K_g від загальної геометрії конструкції

$$K_t = K_g \cdot K_w, \quad (4.1)$$

Якщо у зварному шві наявні дефекти, то їх вплив на концентрацію напружень можна врахувати введенням додаткового коефіцієнту у рівняння (4.1).

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.04	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	ПідписАкр	Дата		

За допомогою (4.1) можна швидко визначати теоретичний коефіцієнт концентрації напружень зварних вузлів із складною геометрією. При цьому можна розглядати вплив на K_t геометрії конструкції та зварного шва окремо.

Верифікація можливості визначення величини K_t множенням коефіцієнтів концентрації виконано на прикладі хрестоподібного зварного з'єднання, схема якого представлена на рис. 4.1.

Теоретичні коефіцієнти концентрації напружень та напружено-деформований стан у представленому на рис. 4.1. зварному вузлі були визначені скінченно-елементним аналізом. Розрахунки виконувались для цієї моделі при різних значеннях радіусу в місці переходу від основного металу до металу шва ρ . Скінченно-елементна сітка будувалась відповідно до вказівок International Institute of Welding.

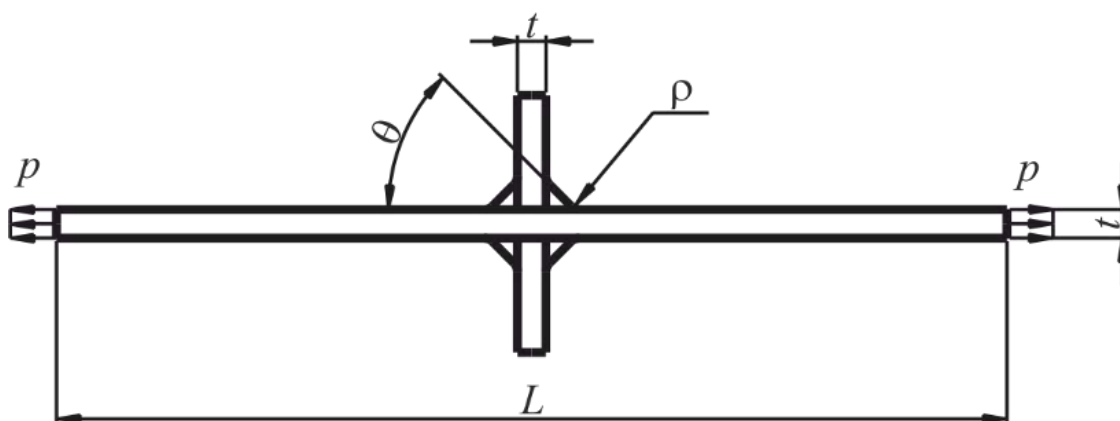


Рис. 4.1. Схема хрестоподібного з'єднання

Результати визначення теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень K_t для показаного на рис. 4.1 вузла скінченно-елементним аналізом при змінній величині радіусу переходу наведені в табл. 4.1 та рис. 4.2.

Результати скінченно-елементного аналізу в табл. 4.1. наведені разом із результатами застосування формули (4.1). Розрахунки виконувались при куті нахилу профілю в місці переходу від основного металу до металу шва $\Theta = 45$ град.

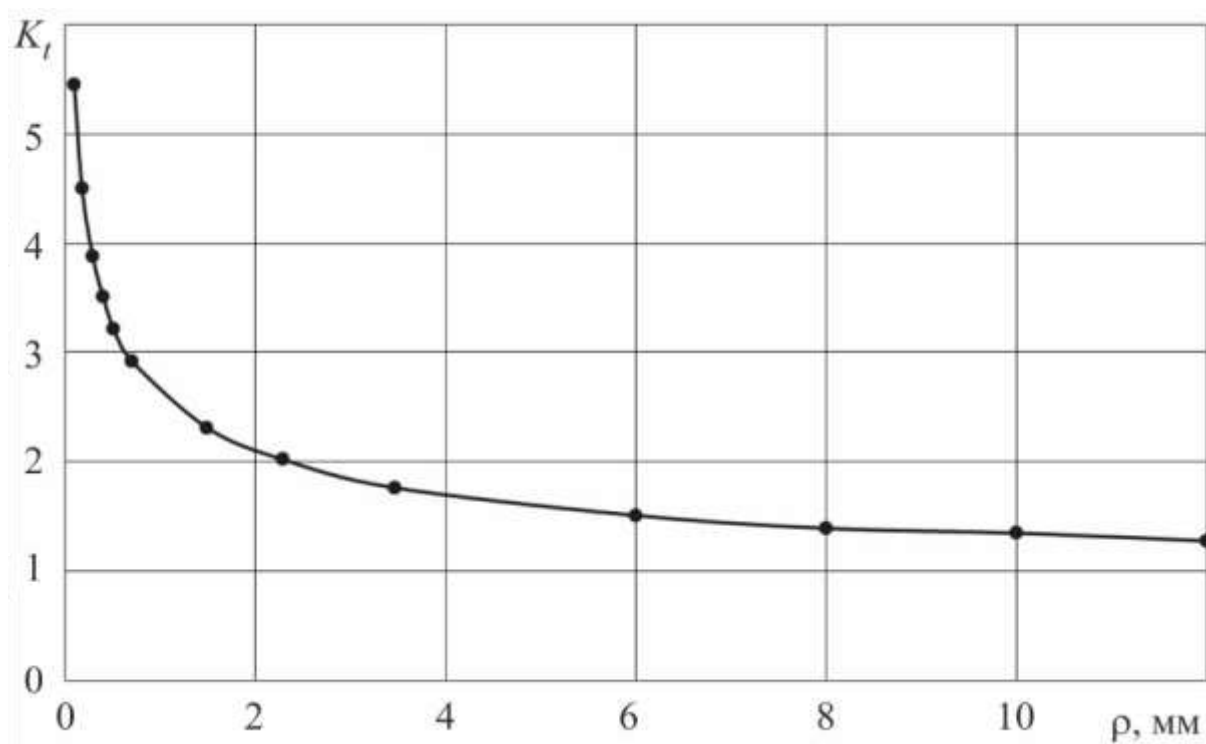


Рис. 4.2. Залежність величини теоретичного коефіцієнта концентрації напружень конструктивного вузла (див. рис. 4.1) від радіусу переходу ρ у зварному шві

Таблиця 4.1 – Порівняння величин теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень, визначених скінченно-елементним аналізом та за наближеною формулою

ρ , мм	K_w	K_g	K_t	$K_g \cdot K_w$	$g_{шв}$, мм	$e_{шв}$, мм
1	2	3	4	5	6	7
12,00	—	—	1,29	—	—	—
10,00	—	—	1,34	—	—	—
8,00	—	—	1,38	—	—	—
6,00	—	—	1,50	—	—	—
3,47	1,60	1,34	1,75	2,15	2	19
2,30	1,71	1,34	2,01	2,31	2	19
1,50	1,88	1,34	2,32	2,54	2	19
0,71	2,32	1,34	2,93	3,14	2	19
0,52	2,44	1,34	3,22	3,29	2	19

Продовження табл. 4.1.

1	2	3	4	5	6	7
0,41	2,72	1,34	3,52	3,66	2	19
0,30	3,94	1,35	3,88	3,96	2	19
0,18	3,28	1,35	4,50	4,43	2	19
0,10	4,14	1,35	5,46	5,59	2	19

Приклад скінченно-елементної сітки 2-вимірної моделі хрестоподібного зварного з'єднання в районі зварного шва показаний на рис. 4.3

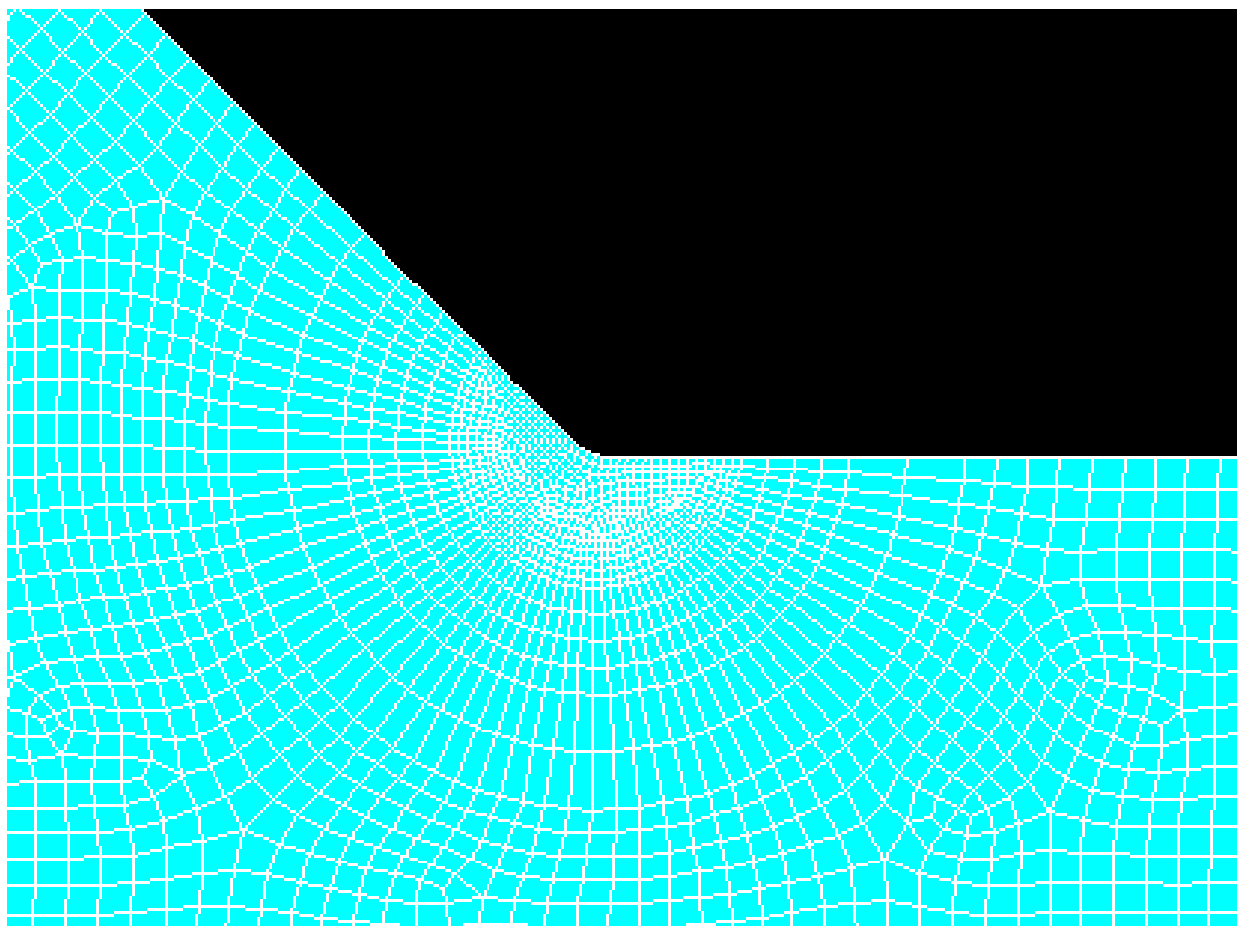


Рис. 4.3. Приклад скінченно-елементної сітки в районі зварного шва хрестоподібного зварного з'єднання

Результати розрахунку приведених напружень за теорією Мізеса представлені на рис. 4.4.

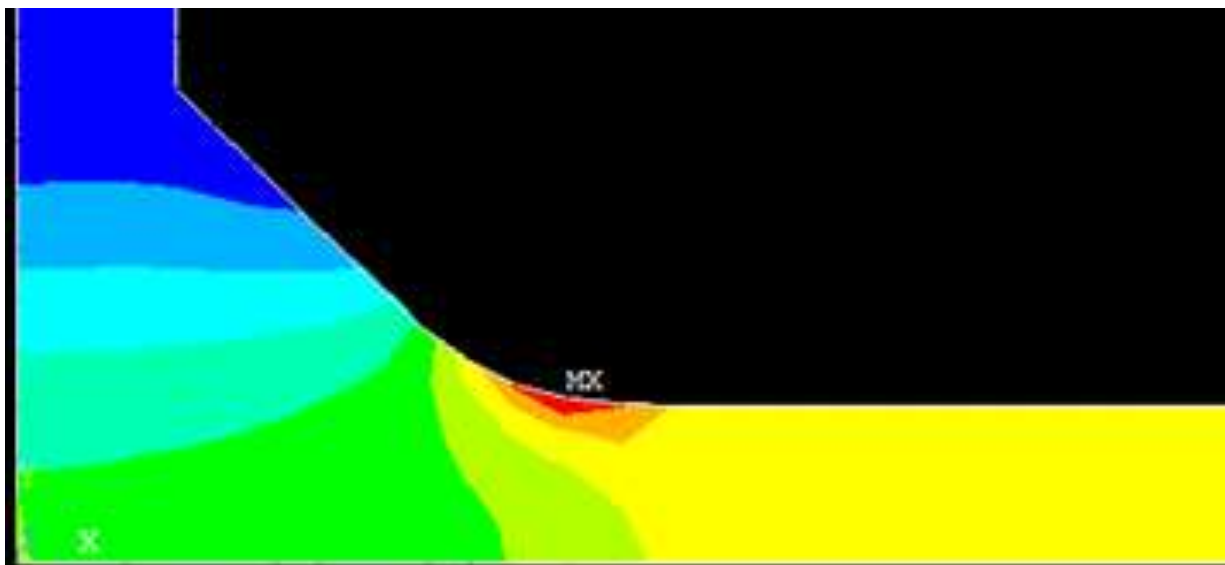


Рис. 4.4. Розподіл приведених напружень за теорією Мізеса у хрестоподібному зварному з'єднанні

Скінченно-елементні сітки та результати визначення напружено-деформованого стану представлені в додатках А та Б, відповідно.

Можна встановити з рис. 4.2, що теоретичний коефіцієнт концентрації напружень починаючи з деякої величини майже не залежить від радіусу переходу. Виходячи з цього було прийнято, що величина $K_g = 1,34$, що відповідає радіусу 10 мм. Теоретичні коефіцієнти концентрації напружень від зварного шва K_w розраховувались при відповідних значеннях ρ та Θ , при цьому потрібно було також підібрати висоту підсилення та ширину такого стикового шва. Останні підбирались відповідно ДСТУ EN ISO 9692-1:2014 для заданої товщини металу 12 мм. Таким чином ширина стикового шва складала 19 мм, а висота підсилення – 2 мм.

З таблиці 4.1 видно, що різниця між коефіцієнтами концентрації напружень, визначеними за допомогою скінченно-елементного аналізу та за допомогою застосування формули (4.1) стає меншою із зменшенням величини радіусу в місці переходу від основного металу до металу шва.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.04	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	Підпис	Акр		

Потрібно також зазначити, що зварним з'єднанням, що зустрічаються на практиці, притаманні значення величини радіусу переходу ρ порядку 1 мм. Виходячи з табл. 4.1, для діапазону значень $\rho < 1$ мм величини теоретичного коефіцієнту концентрації напружень результати застосування формули (4.1) є близькими до методу скінченних елементів.

В результаті виконаних досліджень таким чином, встановлено, що при застосуванні формули (4.1) до визначення теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень конструктивних вузлів суднового корпусу потрібно спочатку визначити коефіцієнт концентрації від наявності зварного шва K_w , встановлюючи його розмірні параметри за ДСТУ EN ISO 9692-1:2014 в залежності від товщини листів досліджуваного з'єднання.

Висновки із розділу 4

На прикладі хрестоподібного зварного вузла виконано перевірку можливості розрахунку теоретичного коефіцієнту концентрації зварних вузлів добутком коефіцієнтів концентрації від загальної геометрії вузла та стикового шва із таким самим радіусом та кутом нахилу профілю шва в місці переходу від основного металу до наплавленого. Показано, що таким способом може бути визначений коефіцієнт концентрації у зварних вузлах.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ.04	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум./літ.	Підпис	Акр		

ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз проблеми концентрації напружень у зварних з'єднаннях та підходи до її вирішення.
2. Описано підходи до визначення напружень у зонах концентрації зварних з'єднань. Обрано для застосування в дослідженнях скінченно-елементний аналіз.
3. Представлені базові розрахункові залежності методу скінченних елементів. Наведено стислий опис програмних комплексів для скінченно-елементного аналізу
4. Виконано аналіз наближених формул для розрахунку значень теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень у зварних стикових швах.
5. Виконано порівняльний аналіз результатів застосування зазначених формул та скінченно-елементного аналізу для визначення теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень у зварних стикових швах. В результаті рекомендовано застосування формули Лоуренса.
6. На прикладі хрестоподібного зварного вузла виконано перевірку можливості розрахунку теоретичного коефіцієнту концентрації зварних вузлів добутком коефіцієнтів концентрації від загальної геометрії вузла та стикового шва із таким самим радіусом та кутом нахилу профілю шва в місці переходу від основного металу до наплавленого. Показано, що таким способом може бути визначений коефіцієнт концентрації у зварних вузлах.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А.В. Молтасов, П.М. Ткач, І.Г. Ткач, В.В. Верушкін Концентрація напружень у стикових зварних з'єднаннях з одностороннім підсиленням АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА, №4, 2019 DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as2019.04.02>
2. Сердюченко А. М., Лугінін О. Є., Коршиков Р. Ю., Дудченко О. М., Коршиков Ю. С. Основы теории пружности, строительной механики, прочности, та вібрації суден: навчальний посібник / за ред. А. М. Сердюченка. Миколаїв: НУК, 2012. 422 с.
3. Niemi E., Fricke W., Maddox S. J. Fatigue Analysis of Welded Components: Designer's Guide to the Structural Hot-spot Stress Approach / International Institute of Welding; IIW-1430-00. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006.
4. Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components / ed. by E. Niemi; International Institute of Welding; IIS/IIW-1221-93 (ex. doc. XIII-1458-92, XV-797-92). Cambridge: Abington Publishing, 1995.
5. Fricke W. IIW Recommendations for the Fatigue Assessment of Welded Structures by Notch Stress Analysis. Woodhead Publishing 2012.
6. Moaveni, S. (2003) Finite Element Analysis, Theory and Application with ANSYS. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
7. Фокин Ф. Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твердого тела: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 131 с.
8. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. Москва: Мир, 1981. 304 с.
9. Махненко В. И., Мосенкис Р. Ю. Расчет коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях со стыковыми и угловыми швами. *Автоматическая сварка*. 1985. №8. С. 7–18.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Makhnenko V. I., Pochynok V. E. Strength Calculation of Welded Joints with Crack-Like Imperfections. Kiev: E.O. Paton Electric Welding Institute, 2006. 266 p.
11. Williams H. E., Ottsen H., Lawrence F. V., Munse W. H. The effects of weld geometry on the fatigue behavior of welded connections / Civil Engineering Studies. Structural Research Series No.366. Illinois: University of Illinois Urbana, august 1970.

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

Результати оцінки концентрації напружень у зварних стикових швах

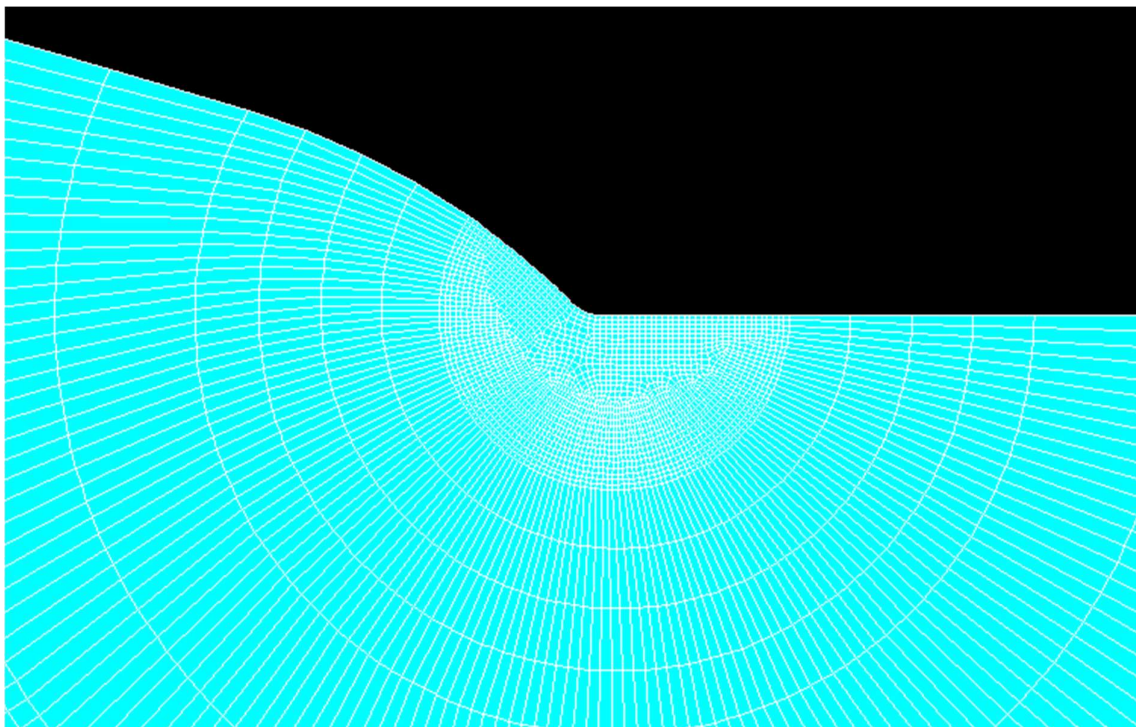


Рис. А.1. Скінченно-елементна сітка стикового шва із радіусом переходу $R = 0,1$ мм та шириною шва $g = 2$ мм в околі концентратора напружень

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

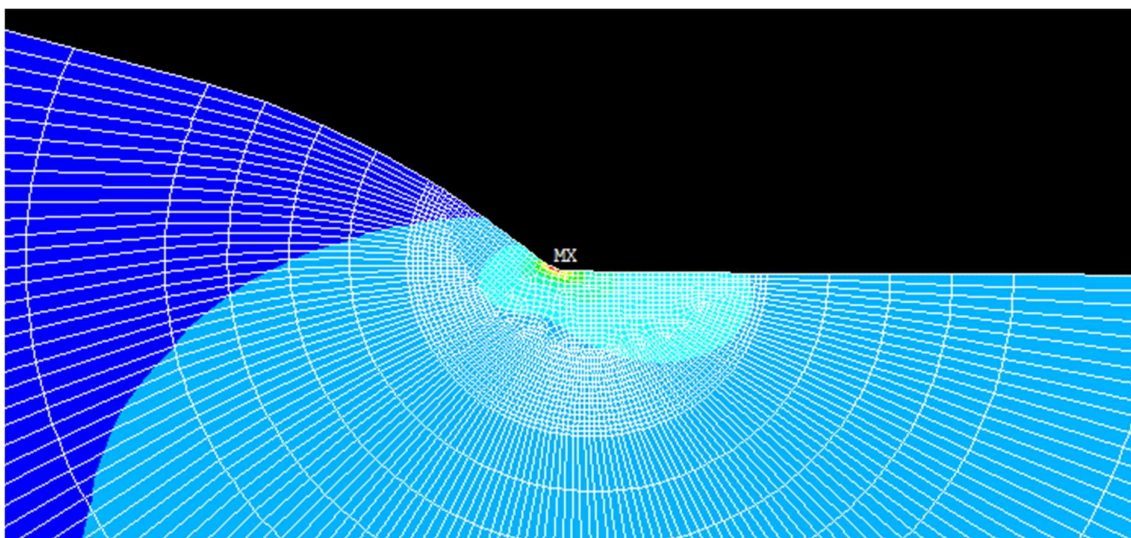


Рис. А.2. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у стиковому шві із радіусом переходу $R = 0,1$ мм та шириною шва $g = 2$ мм.

Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $K_t = 4,14$

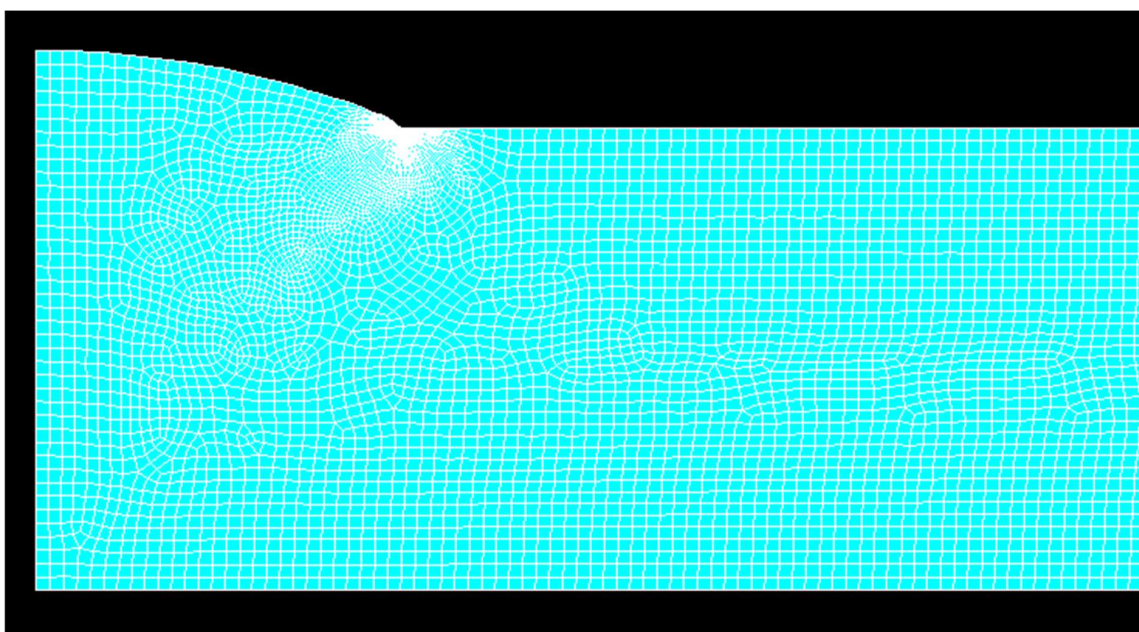


Рис. А.3. Скінченно-елементна сітка стикового шва із радіусом переходу $R = 0,18$ мм та шириною шва $g = 2$ мм

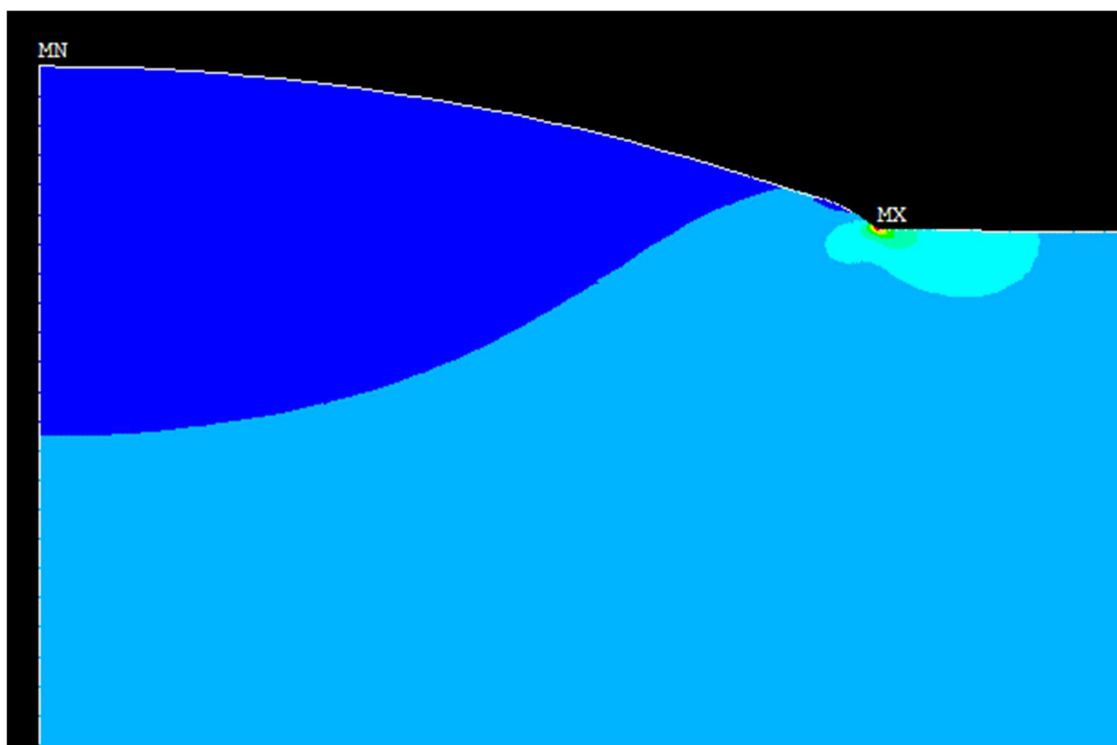


Рис. А.4. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у стиковому шві із радіусом переходу $R = 0,18$ мм та шириною шва $g = 2$ мм.

Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $K_t = 3,28$

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

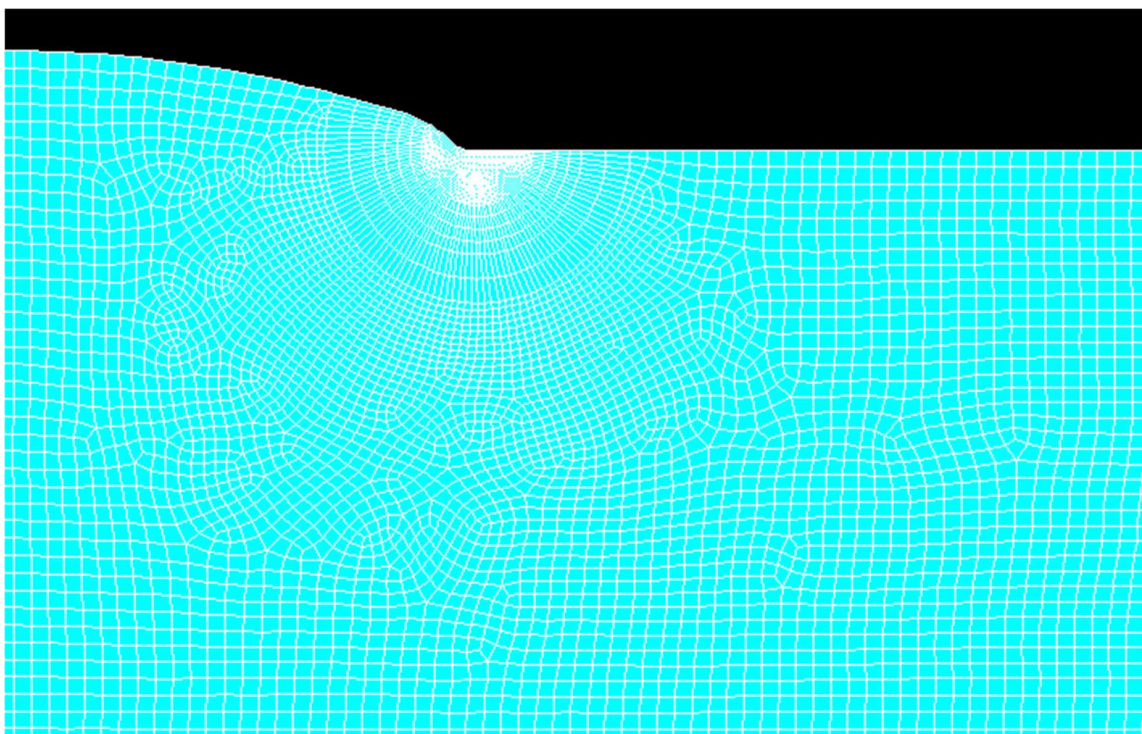


Рис. А.5. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у стиковому шві із радіусом переходу $R = 0,41$ мм та шириною шва $g = 2$ мм

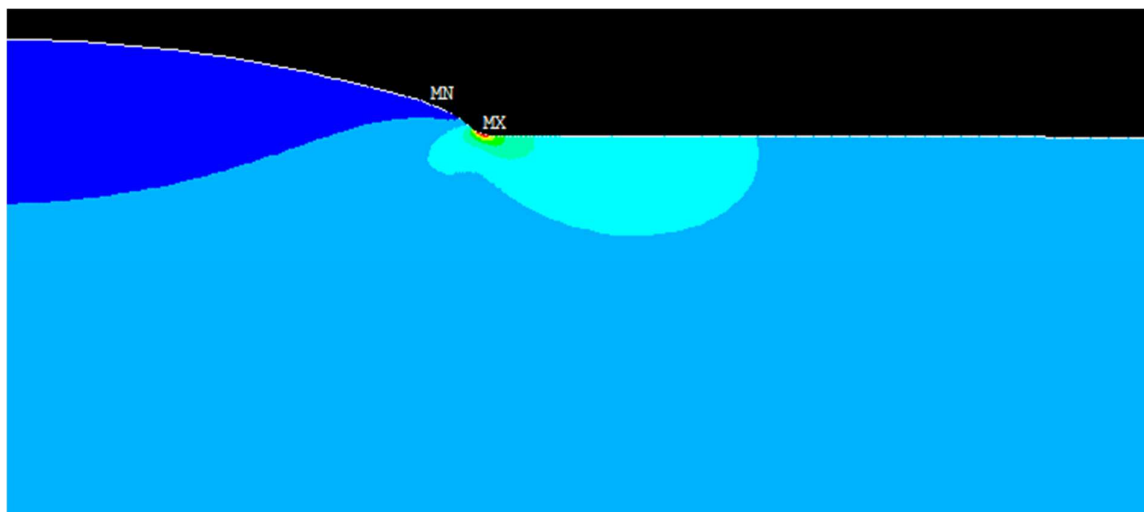


Рис. А.6. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у стиковому шві із радіусом переходу $R = 0,41$ мм та шириною шва $g = 2$ мм.
Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $K_t = 3,28$

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

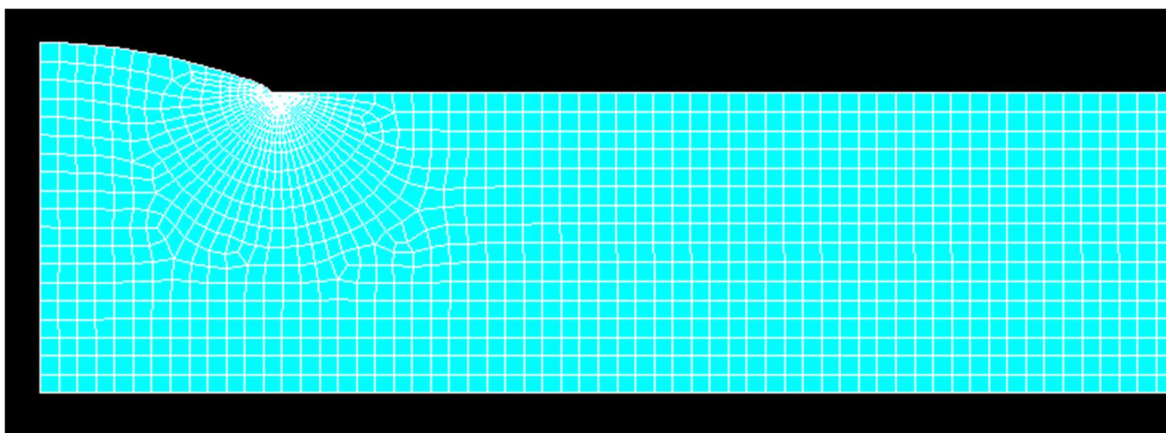


Рис. А.7. Скінченно-елементна сітка стикового шва із радіусом переходу $R = 0,52$ мм та шириною шва $g = 2$ мм

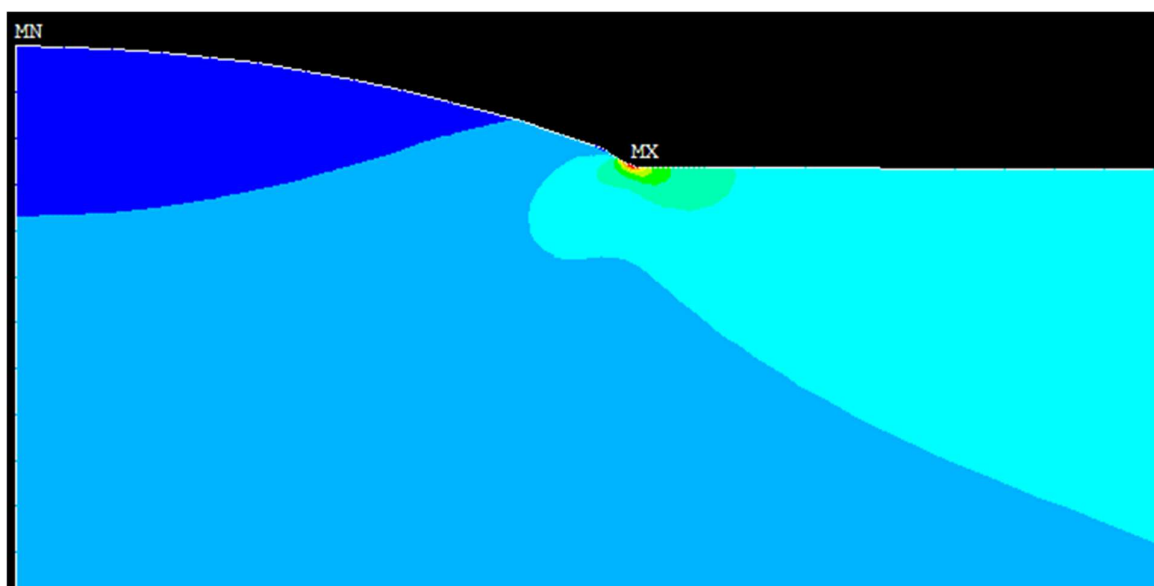


Рис. А.8. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у стиковому шві із радіусом переходу $R = 0,52$ мм та шириною шва $g = 2$ мм.

Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $K_t = 2,49$

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

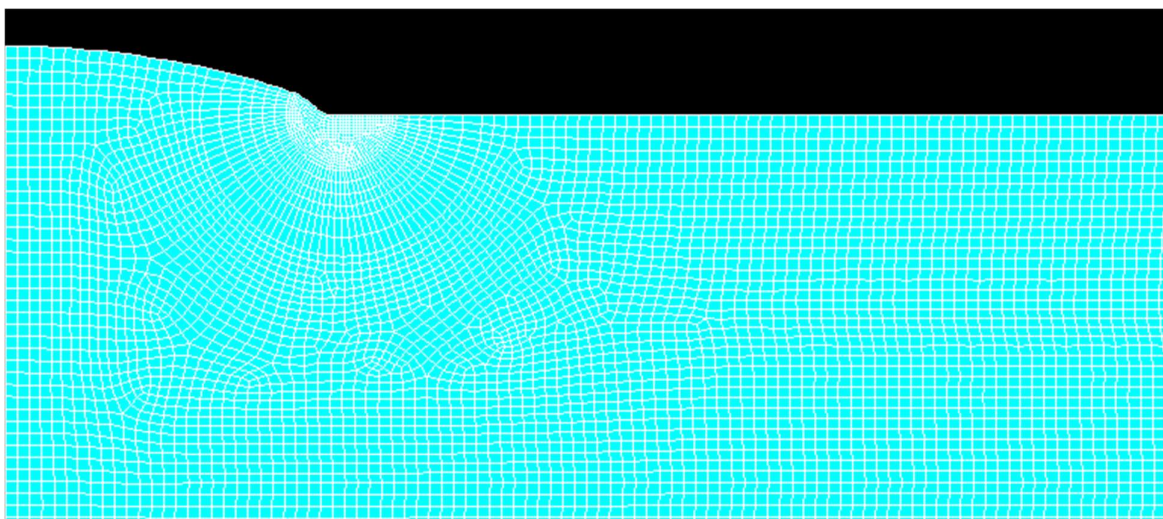


Рис. А.9. Скінченно-елементна сітка стикового шва із радіусом переходу $R = 0,71$ мм та шириною шва $g = 2$ мм

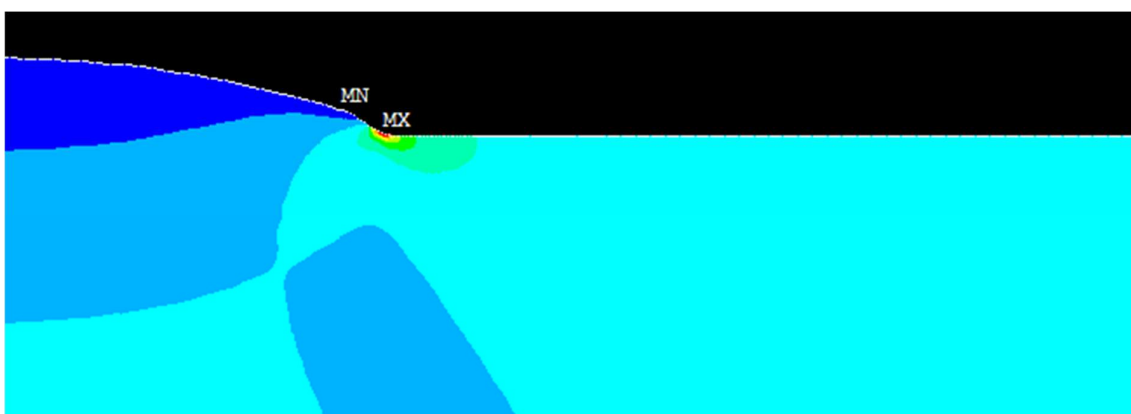


Рис. А.10. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у стиковому шві із радіусом переходу $R = 0,71$ мм та шириною шва $g = 2$ мм.
Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $K_t = 2,32$

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

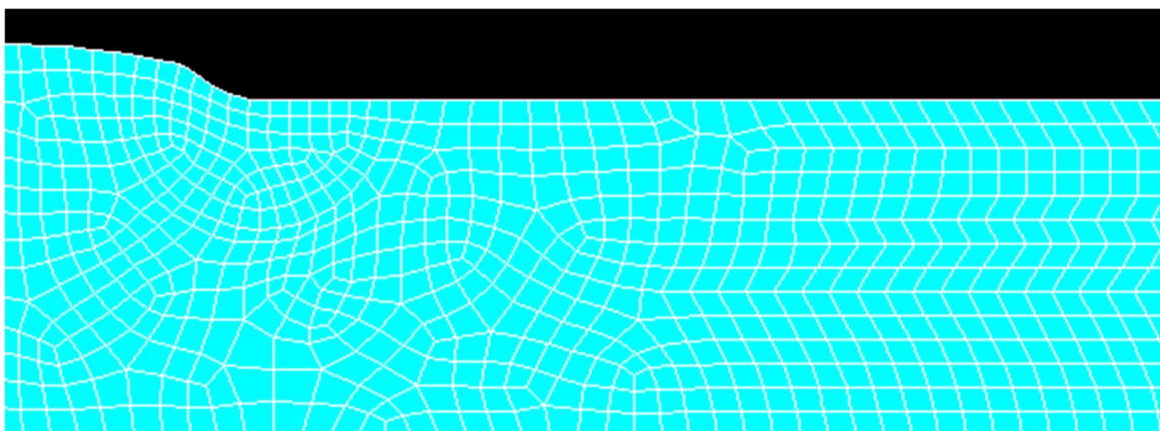


Рис. А.11. Скінченно-елементна сітка стикового шва із радіусом переходу $R = 3,47$ мм та шириною шва $g = 2$ мм

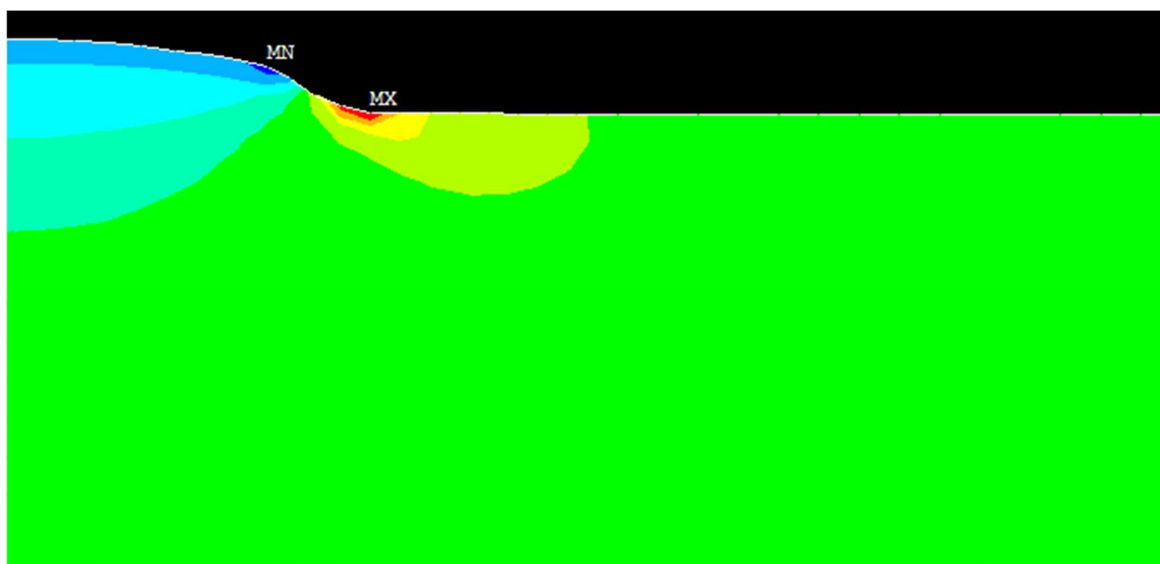


Рис. А.12. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у стиковому шві із радіусом переходу $R = 3,47$ мм та шириною шва $g = 2$ мм. Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $K_t = 1,6$

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б

Результати оцінки теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень хрестоподібних з'єднань

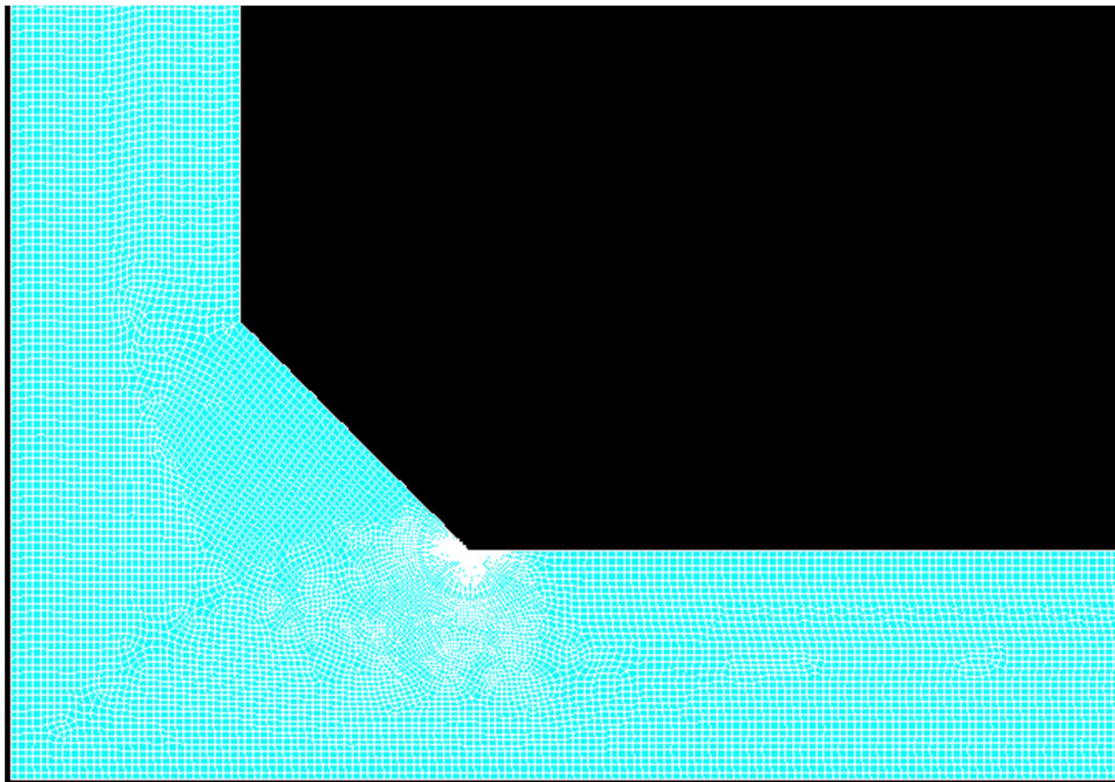


Рис. В.1. Скінченно-елементна сітка хрестоподібного зварного з'єднання із радіусом переходу $R = 0,1$ мм при куті нахилу профілю шва в місці переходу $\Theta = 45$ град

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

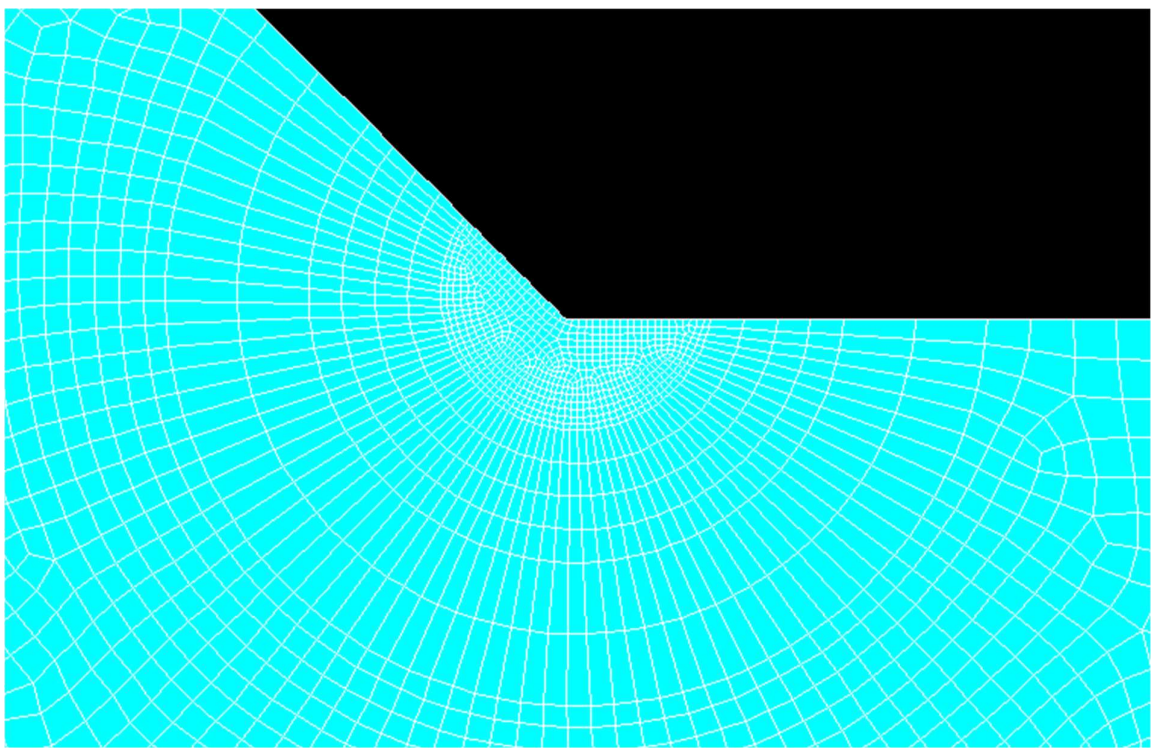


Рис. В.2. Скінченно-елементна сітка хрестоподібного зварного з'єднання із радіусом переходу $R = 0,1$ мм в околі осередку концентрації

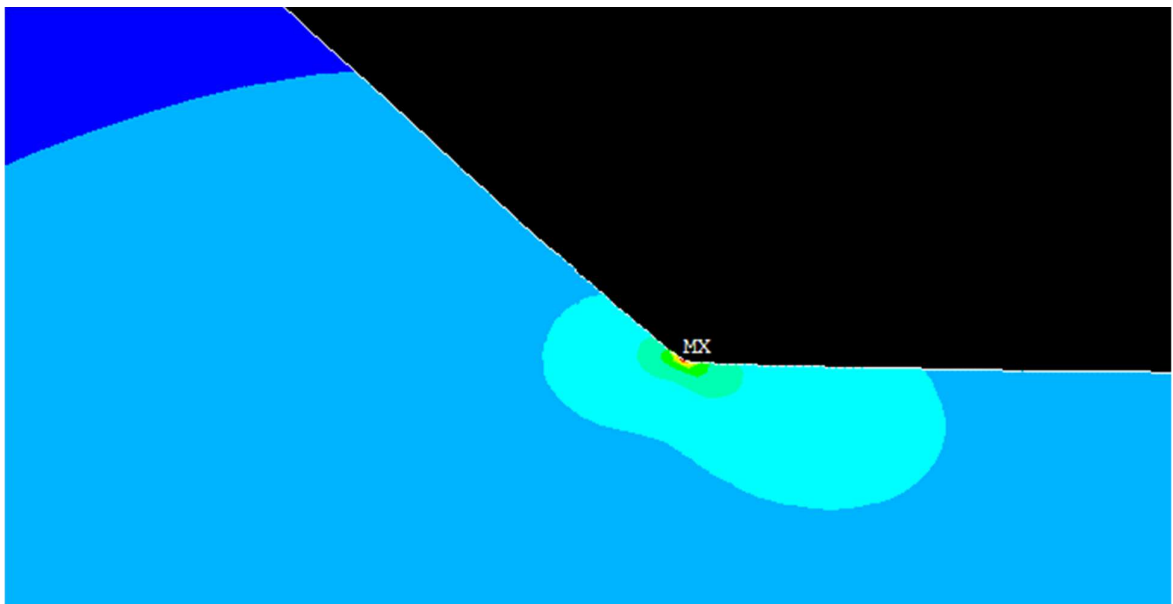


Рис. В.3. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у хрестоподібному зварному з'єднанні із радіусом переходу $R = 0,1$ мм.

Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $K_t = 5,46$

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

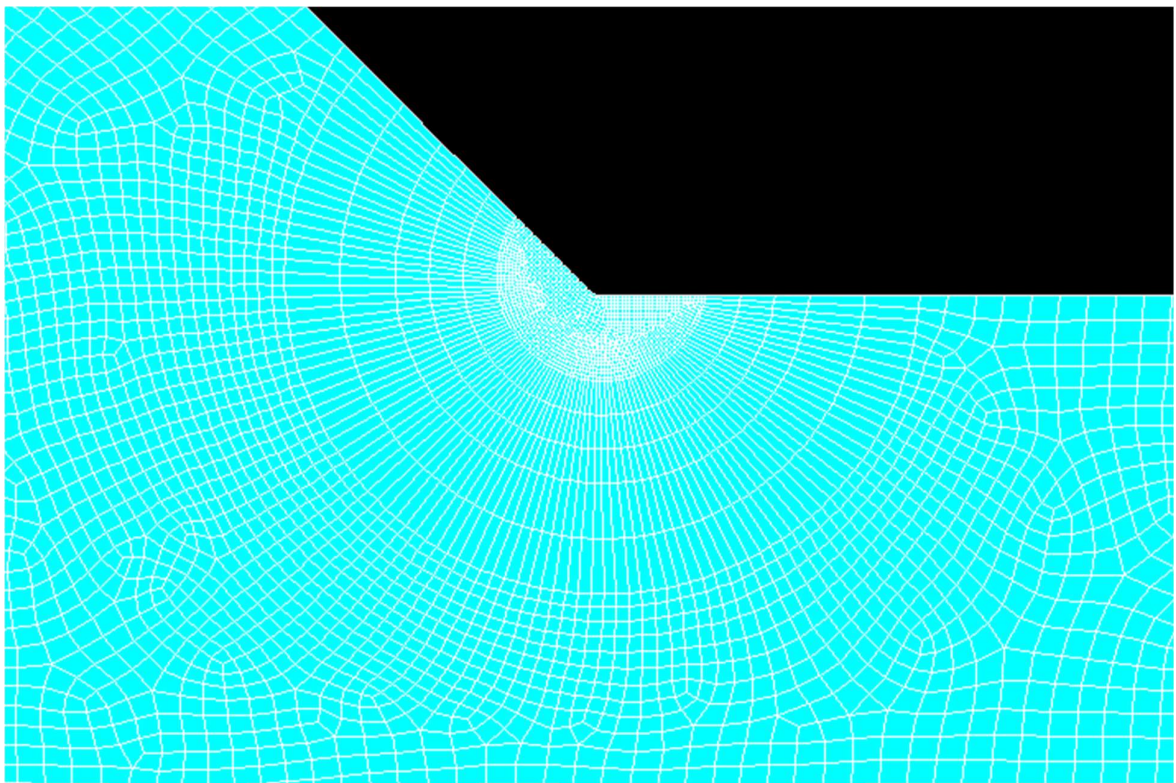
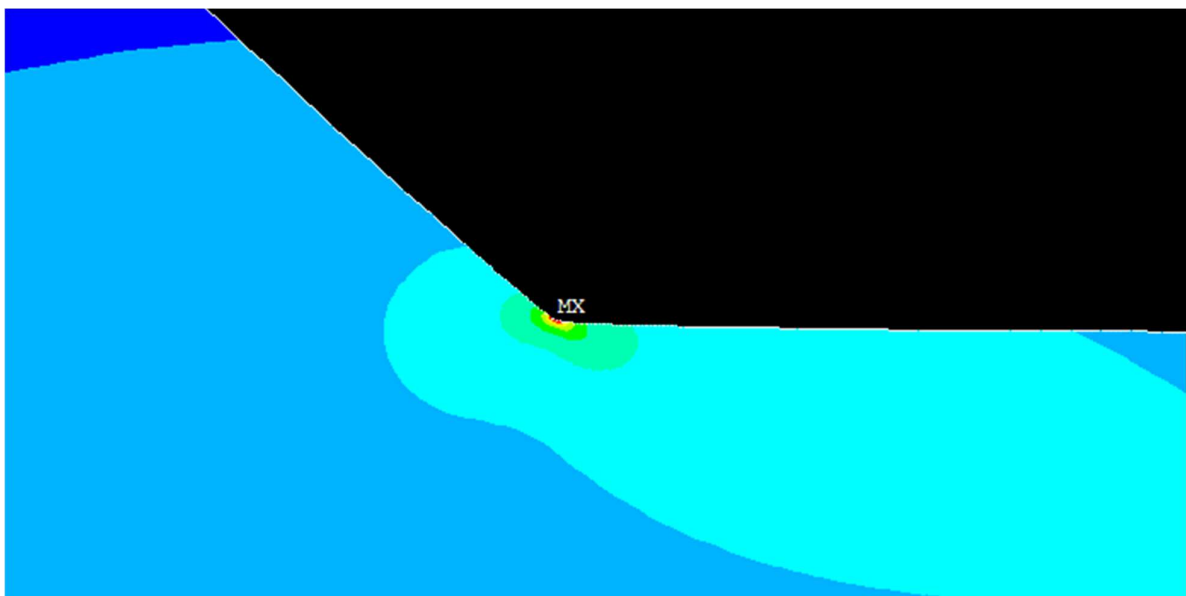


Рис. В.4. Скінченно-елементна сітка хрестоподібного зварного з'єднання із радіусом переходу $R = 0,18$ мм в околі осередку концентрації



					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис. В.5. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у хрестоподібному зварному з'єднанні із радіусом переходу $R = 0,18$ мм.
Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $K_t = 4,5$

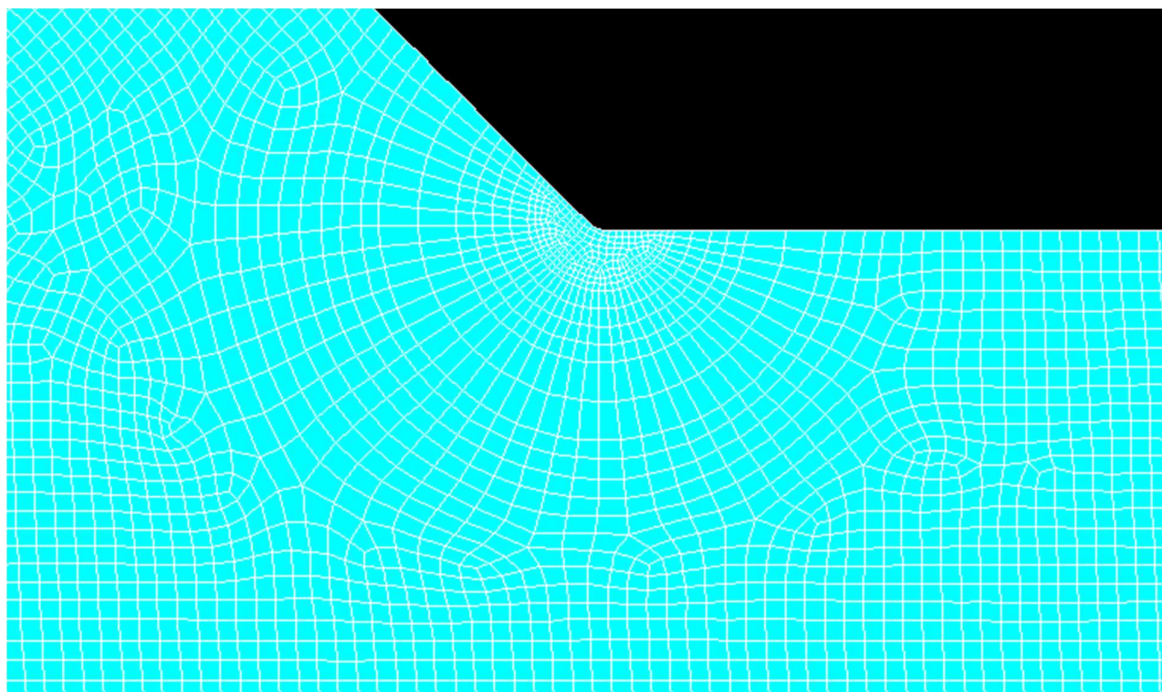


Рис. В.6. Скінченно-елементна сітка хрестоподібного зварного з'єднання із радіусом переходу $R = 0,41$ мм в околі осередку концентрації

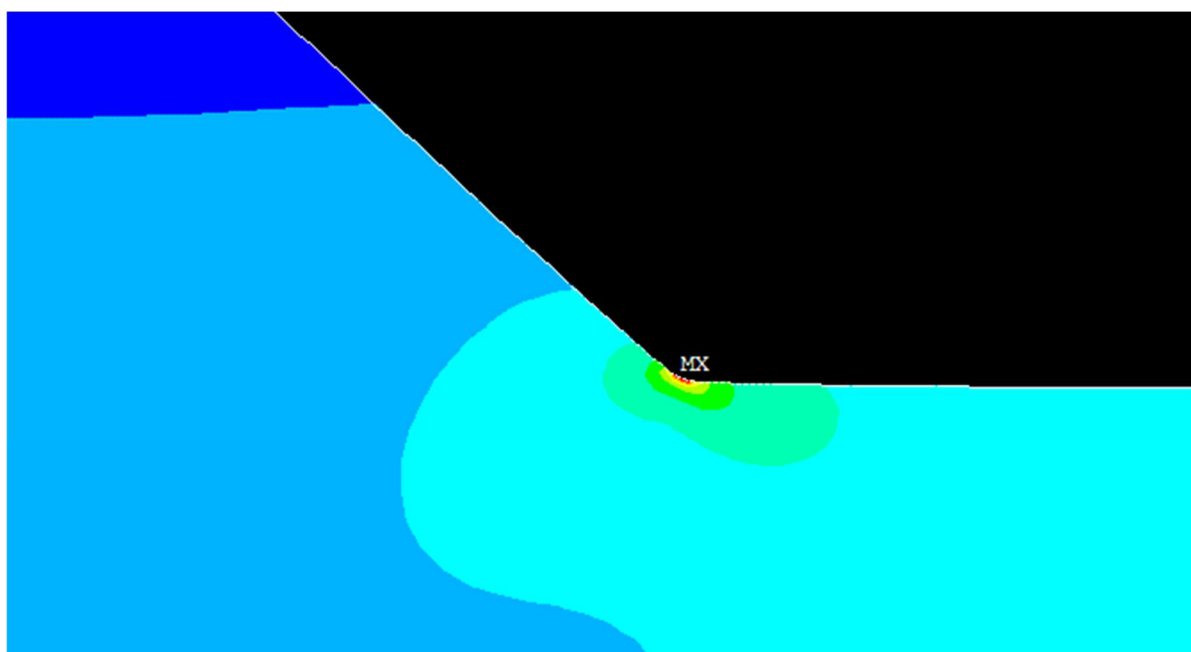


Рис. В.7. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у хрестоподібному зварному з'єднанні із радіусом переходу $R = 0,41$ мм.
Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $K_t = 3,66$

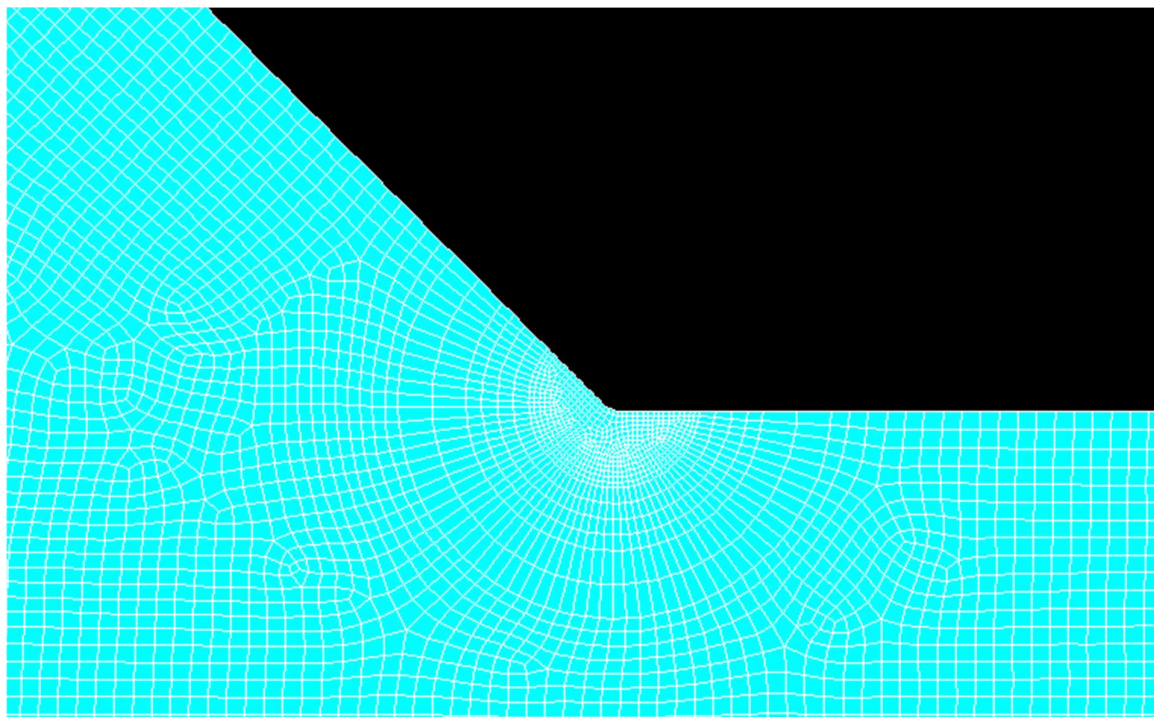


Рис. В.8. Скінченно-елементна сітка хрестоподібного зварного з'єднання із радіусом переходу $R = 0,52$ мм в околі осередку концентрації

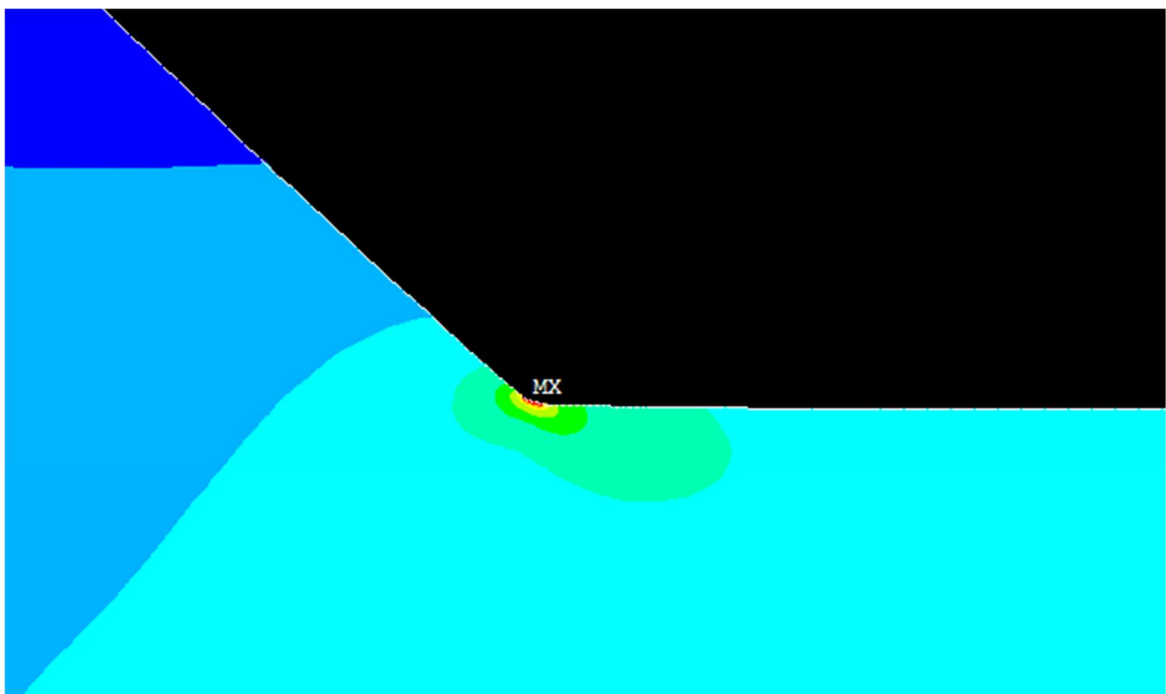


Рис. В.9. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у хрестоподібному зварному з'єднанні із радіусом переходу $R = 0,52$ мм.

Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $K_t = 3,22$

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

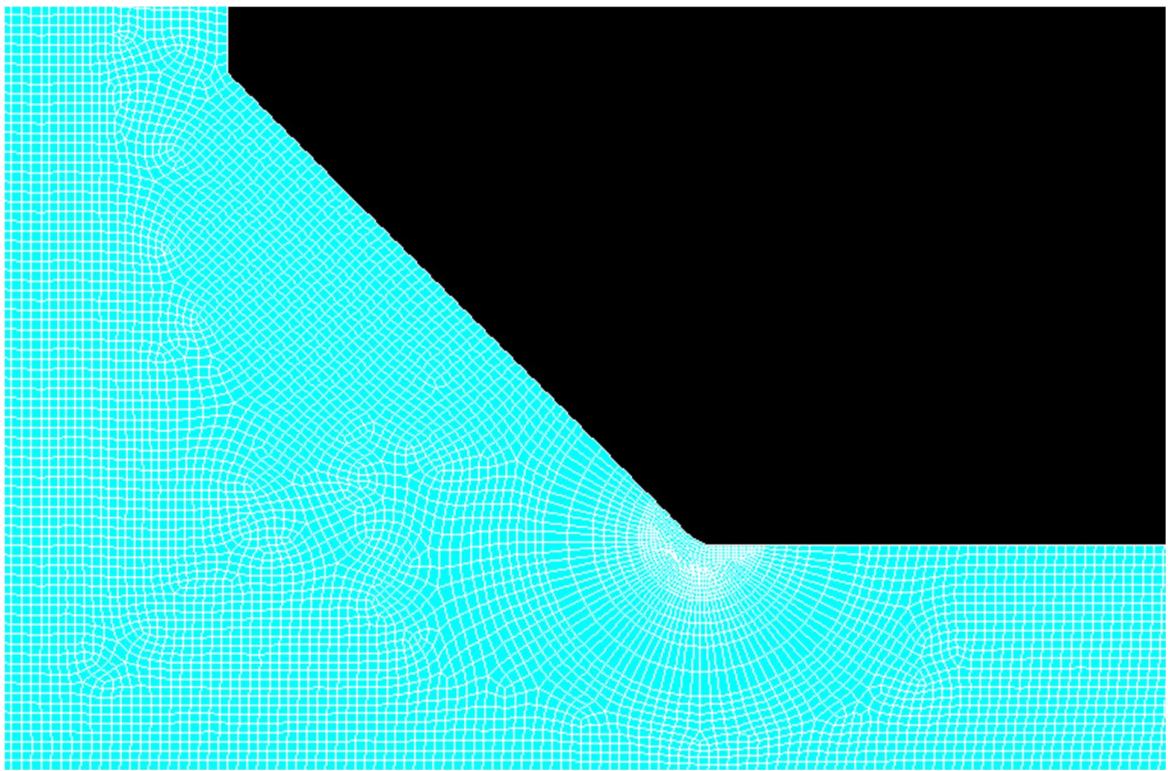


Рис. В.10. Скінченно-елементна сітка хрестоподібного зварного з'єднання із радіусом переходу $R = 0,71$ мм в околі осередку концентрації

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

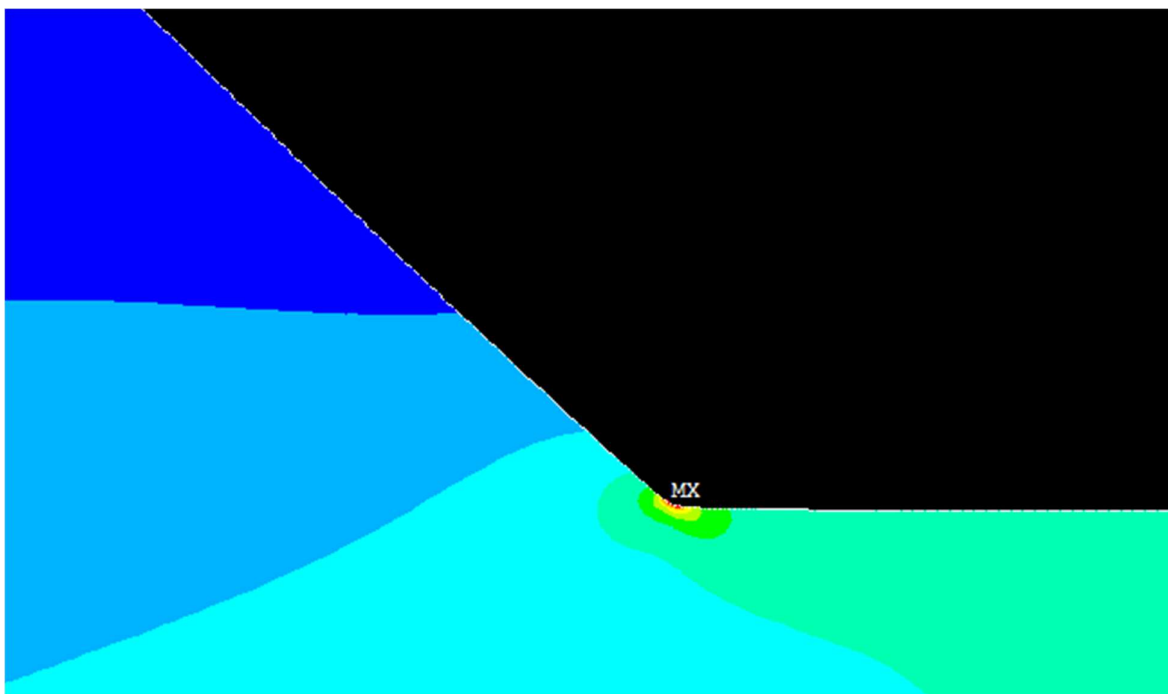


Рис. В.11. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у хрестоподібному зварному з'єднанні із радіусом переходу $R = 0,71$ мм.

Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $K_t = 2,93$

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

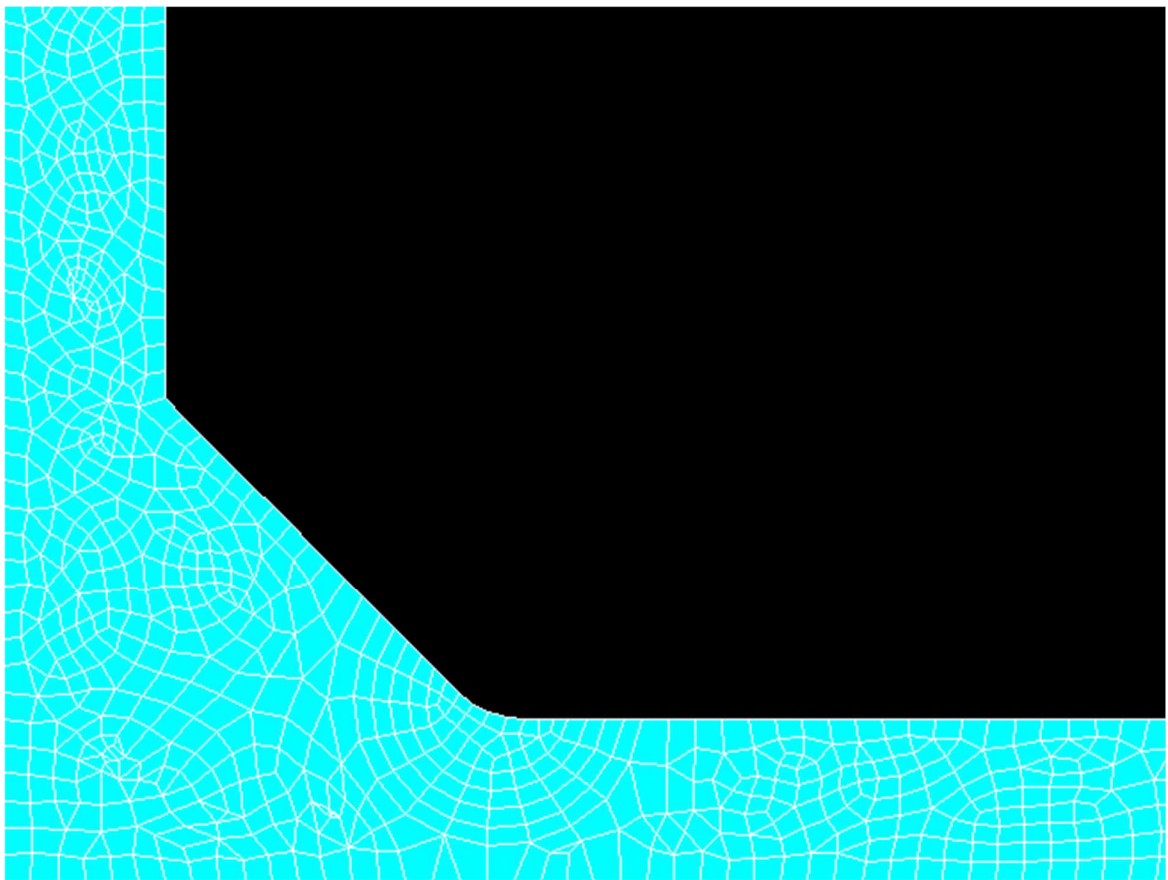


Рис. В.12. Скінченно-елементна сітка хрестоподібного зварного з'єднання із радіусом переходу $R = 3,47$ мм

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

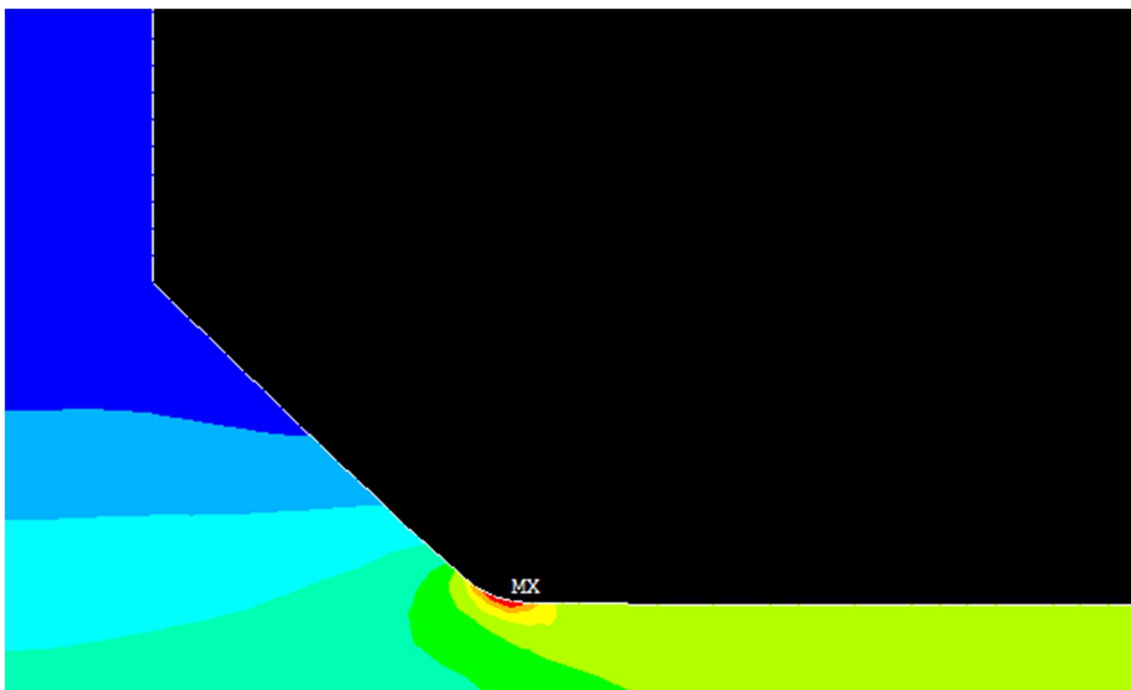
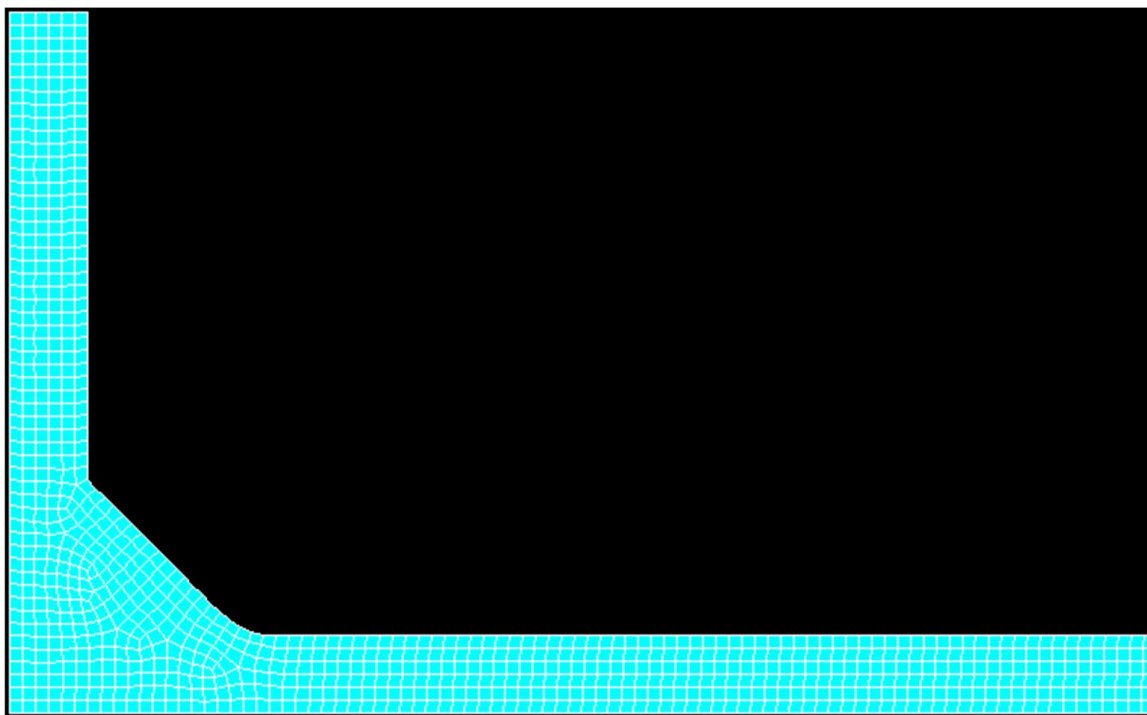


Рис. В.13. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у хрестоподібному зварному з'єднанні із радіусом переходу $R = 3,47$ мм.

Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $K_t = 1,75$



					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис. В.14. Скінченно-елементна сітка хрестоподібного зварного з'єднання із радіусом переходу $R = 6$ мм

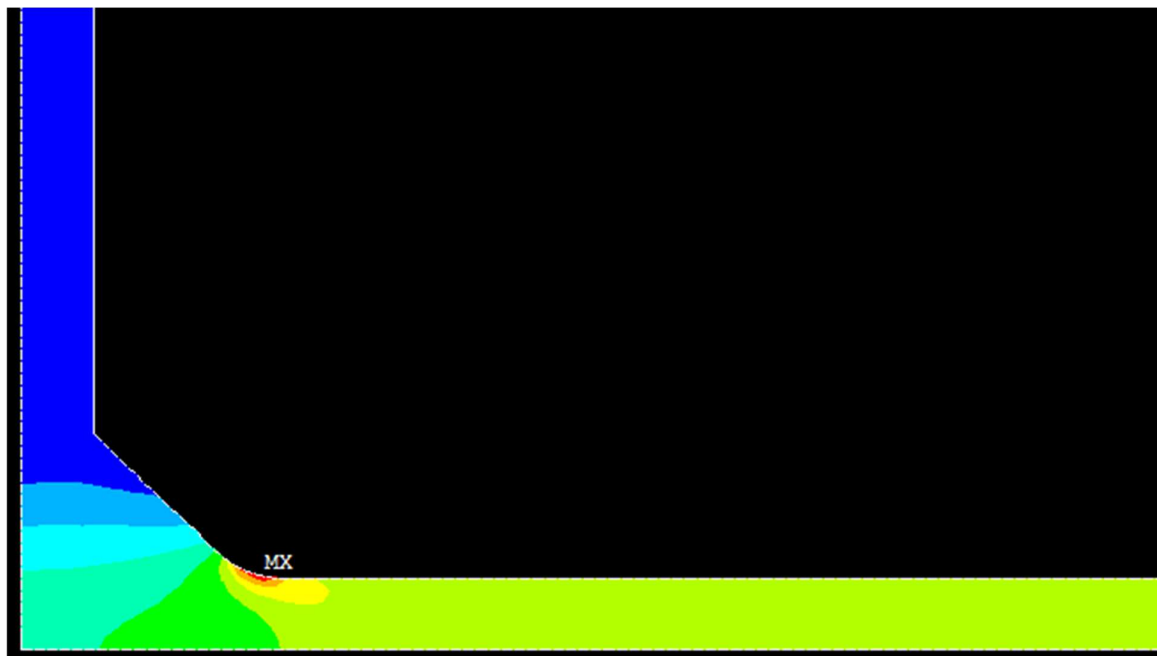


Рис. В.15. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у хрестоподібному зварному з'єднанні із радіусом переходу $R = 6$ мм.

Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $K_t = 1,5$

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

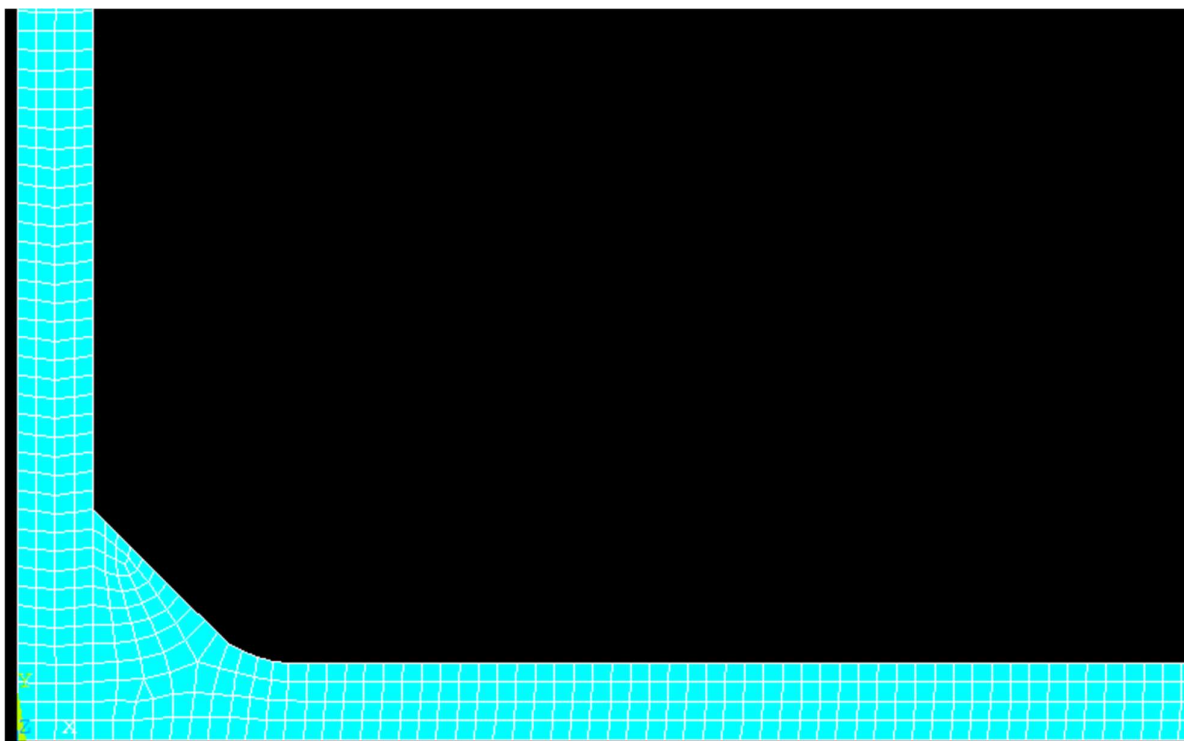


Рис. В.16. Скінченно-елементна сітка хрестоподібного зварного з'єднання із радіусом переходу $R = 8$ мм



Рис. В.17. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у хрестоподібному зварному з'єднанні із радіусом переходу $R = 8$ мм.
Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $K_t = 1,38$

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

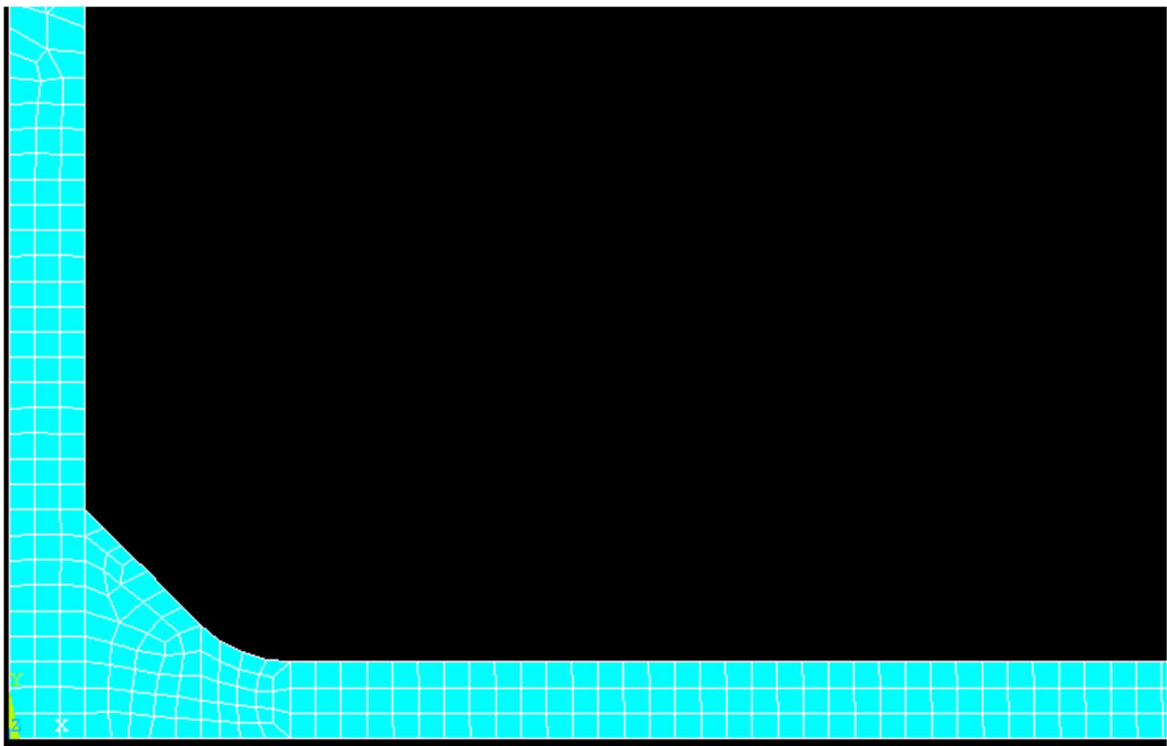


Рис. В.18. Скінченно-елементна сітка хрестоподібного зварного з'єднання із радіусом переходу $R = 10$ мм

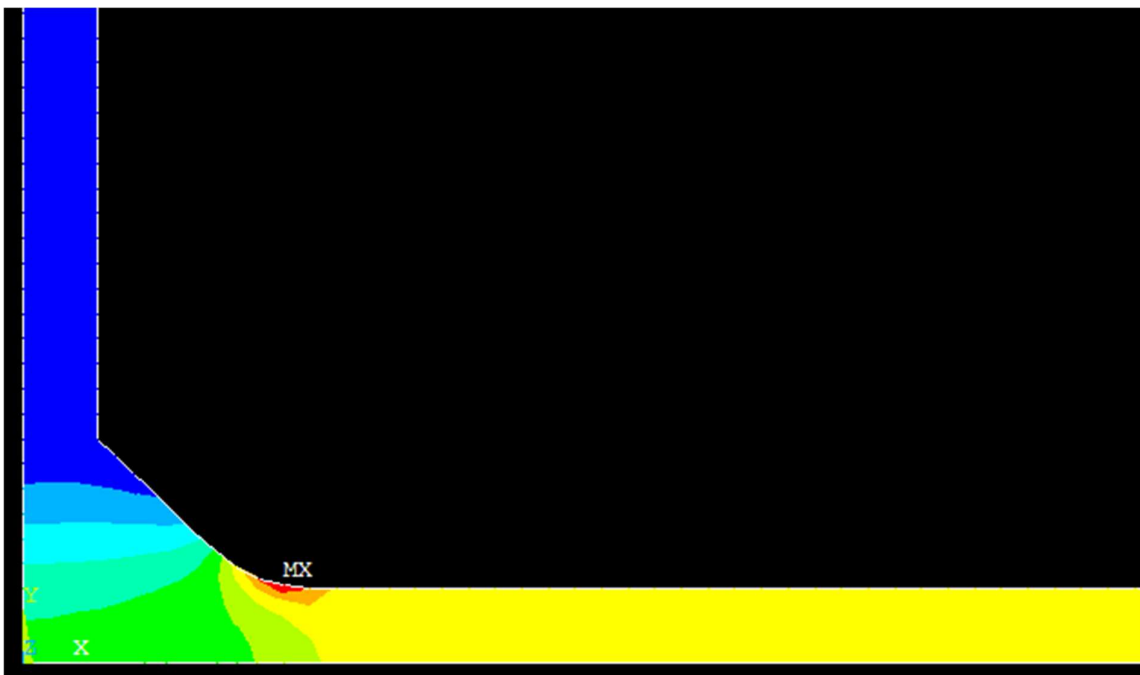


Рис. В.19. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у хрестоподібному зварному з'єднанні із радіусом переходу $R = 10$ мм.

Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $K_t = 1,34$

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

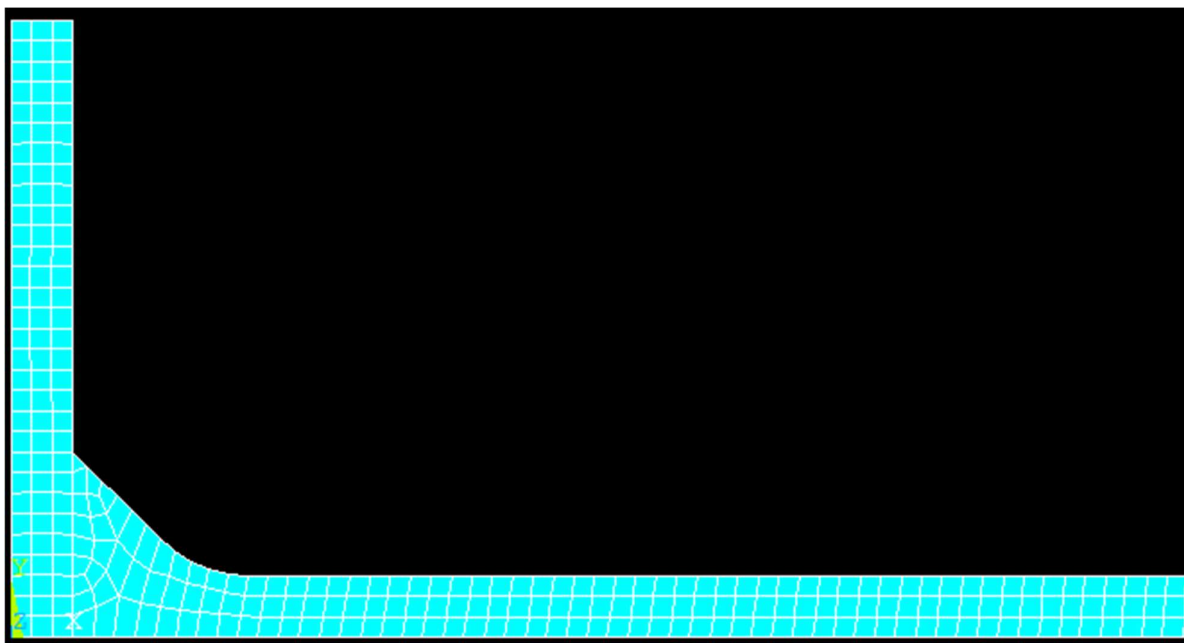


Рис. В.20. Скінченно-елементна сітка хрестоподібного зварного з'єднання із радіусом переходу $R = 12$ мм



Рис. В.21. Розподіл напружень в околі осередку концентрації напружень у хрестоподібному зварному з'єднанні із радіусом переходу $R = 12$ мм.
Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $K_t = 1,29$

					19.МР.135.6116м.12.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		