

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний факультет
(повне найменування інституту, факультету)

Деталей машин, лінійно-транспортних механізмів
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту (роботи)

(ступінь вищої освіти)

на тему Оцінка стану металоконструкцій розет
механіки руйнування м'якого тіла

Виконав: студент(ка) 4 курсу, групи М-311

Спеціальності 133 Інженерно-машинобудівництво
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Лінійно-транспортні, будівельні, енергетичні
машини і обладнання
(прізвище та ініціали)

Керівник Мартовичук Л.М.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Сидоренко М.В.
(прізвище та ініціали)

20.25

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет ИУЗН, Машинобудівний
Кафедра Деталей машин, підйомно-транспортних механізмів
Ступінь вищої освіти бакалавр
Спеціальність підйомно-транспортні, будівельні, металургійні та аеромашинобудівні
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) 133 Таргове машинобудівництво
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« _____ » _____ 20 ____ року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Головатчик Микола Ігорович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Оцінка стану металоконструкцій з пошкодженою механікою руйнування твердого тіла.

керівник проєкту (роботи) Мартовичук Л.М.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 25 » квітня 20 25 року № 208

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 10 червня 2025 року

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) 1. Теоретичні відомості про аварії підйомно-транспортних машин

2. Теоретичні відомості про розриви при тріщині в елементах кранових конструкцій

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Причини аварій підйомно-транспортних машин

2. Зони розриву при тріщині в елементах кранових конструкцій

3. Механізм руйнування 4. Критерії руйнування 5. Застосування методів теорії руйнування до оцінки довговічності зварних конструкцій

6. Процес руйнування зварних з'єднань і закономірності її розвитку

7. Прикладне застосування теорії руйнування

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

Лист 1 - формат А4 - "Графіки"

Лист 2 - формат А3 - "Схема зони розриву при тріщині в металоконструкції кранової конструкції"

Лист 3 - формат А3 - "Схема умов настання граничного стану руйнування при тріщині зварного з'єднання"

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	Мартовичук Л.М. доцент	20.04	04.05
2	Мартовичук Л.М. доцент	04.05	11.05
3	Мартовичук Л.М. доцент	26.05	26.05

7. Дата видачі завдання « 25 » квітня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Тезиси аварій підйомно-транспортних машин	14.03	
2	Зона ризиків пошкодження в системі управління	20.04	
3	Механізм руйнування	20.04	
4	Критерії руйнування	04.05	
5	Застосування методів теорії руйнування	11.05	
6	Процес руйнування зварних з'єднань	26.05	
7	Прикладне застосування теорії руйнування	01.06	
8	Модельовані умови настання аварійного стану руйнування	01.06	

Студент

Керівник проєкту (роботи)

(підпис)

Головатченко М.І.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Об'єкт дослідження – зварні металоконструкції підйомно-транспортного обладнання.

Метою дослідження є створення методології для оцінювання технічного стану металоконструкцій кранів та прогнозування моменту досягнення критичного стану зварних швів.

Метод дослідження базується на практичному використанні основних положень теорії руйнування та механіки тріщин.

У процесі проектування металевих конструкцій машин виникають два ключові завдання: по-перше, визначення найбільш раціональних геометричних характеристик конструкції; по-друге, оцінка її довговічності та стійкості до втомного навантаження. Перше завдання традиційно вирішується з використанням методів класичної механіки, тоді як для вирішення другого необхідно застосовувати підходи механіки руйнування, що спирається на досягнення теорії пружності, опору матеріалів і будівельної механіки.

Особливу роль відіграє часовий чинник, який у рамках класичної механіки зазвичай не розглядається. Процес руйнування відбувається поступово – через виникнення та розвиток пошкоджень, і визначається проміжком часу від моменту дії зовнішнього навантаження до остаточного виходу з ладу, тобто періодом експлуатаційної витривалості.

Очевидно, що використання знань з фізики та механіки руйнування дозволяє не лише аналізувати надійність існуючих конструкцій, але й виконувати зворотне завдання – проектувати конструкції з наперед заданими показниками довговічності чи строком служби. В умовах сучасної експлуатації стає дедалі актуальнішим завдання визначення залишкового ресурсу металоконструкцій машин, які вже тривалий час перебувають в роботі.

МЕХАНІКА РУЙНУВАННЯ, МЕХАНІКА ТРІЩИН, НАПРУЖЕННЯ, КРИХКІСТЬ, ПЛАСТИЧНІСТЬ, В'ЯЗКІСТЬ, ВТОМНЕ РУЙНУВАННЯ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, ПОШКОДЖЕННЯ, МІКРОТРІЩИНИ, МАКРОТРІЩИНИ, ЛАБІЛЬНИЙ СТАН.

ЗМІСТ

Завдання на проект	2
Реферат	4
Вступ	8
1 Причини аварій підйомно-транспортних машин	10
2 Зони ризику появи тріщин в елементах кранових конструкцій	13
2.1 Кінцеві балки	13
2.2 Головні балки	14
3 Механіка руйнування	17
3.1 Введення в механіку руйнування	17
3.2 Реальні матеріали й конструкції	19
3.3 Масштабний фактор у теорії руйнування	20
3.4 Непрогресуючі дефекти	23
3.5 Теорія тріщин у механіці руйнування	24
3.6 Зрушення й ріст тріщини	26
3.7 Особливості будови втомних зломів	28
3.8 Зміна фізичних властивостей металів у процесі циклічного навантаження	33
4 Критерії руйнування	35
4.1 Різноманітність критеріїв руйнування	35
4.2 Структурно-енергетична теорія втоми	39
4.3 Зведена таблиця критеріїв руйнування	46
5 Застосування методів теорії руйнування до оцінки довговічності зварних конструкцій	54
5.1 Критерії міцності й пластичності в механіці руйнування зварних з'єднань	54
5.2 Критичні коефіцієнти інтенсивності напружень	58

	7
5.3 Стикові з'єднання	61
5.4 З'єднання з кутовими й тавровими швами	61
5.5 Деформаційні критерії	63
5.6 Енергетичні критерії	64
6 Процес руйнування зварних з'єднань з позиції механіки тріщин	67
6.1 Процес втомного руйнування	67
6.2 Зародження тріщини у зварних з'єднаннях і закономірності її росту	69
7 Прикладне застосування теорії руйнування	71
7.1 Визначення довговічності зварних конструкцій з позиції механіки руйнування	71
7.2 Вплив залишкових зварних напружень на довговічність швів	80
7.3 Оцінка довговічності зварних з'єднань із тріщиноподібними дефектами	82
8 Моделювання умов настання граничного стану руйнування при проектуванні зварного виробу	90
Висновки	94
Перелік посилань	96

ВСТУП

Кожна металева конструкція має певний запас працездатності, який визначається ще на етапі проєктування. Це завдання інженерів-конструкторів, які застосовують методи класичної механіки для забезпечення надійності конструкції. Проте після введення обладнання в експлуатацію на підприємстві розпочинається незворотний процес втоми металу та його з'єднань. Що робити, коли на підприємстві експлуатується кран, що прослужив уже десятки років? Як визначити його технічний стан і спрогнозувати залишкову працездатність?

У процесі багаторазового навантаження конструкція поступово втрачає свій ресурс, у металі змінюються механічні властивості, накопичуються пошкодження. Саме такі зміни стали причиною численних аварій, а подекуди й катастроф. У зв'язку з цим були запроваджені нові нормативи, які передбачають припинення експлуатації обладнання при виявленні тріщин у несучих елементах. Це суттєво знизило кількість аварій підйомно-транспортних машин на виробництві, однак викликало спротив з боку керівників підприємств, адже їм не вистачало обґрунтованих розрахунків щодо розвитку тріщин, окрім загальновідомих фактів про небезпеку пошкоджень у розтягнутих або надмірно навантажених деталях. Часто виникають сумніви щодо доцільності негайної зупинки крана, але ризик у таких випадках неприпустимий.

Тому надзвичайно важливо встановити, чи становить тріщина реальну загрозу, чи це лише незначний дефект, який не буде розвиватися далі. Методи класичної механіки не дозволяють дати відповідь на це питання, оскільки вони не враховують чинник часу й можуть оцінити лише миттєву міцність конструкції. Отже, виникає потреба у нових підходах до вирішення цієї проблеми.

У зв'язку з цим упродовж останніх десятиліть сформувався й інтенсивно розвивається новий науковий напрям — механіка руйнування. Ця галузь досліджує умови рівноваги та поширення макротріщин у навантажених конструктивних елементах аж до моменту повного руйнування. Основне завдання полягає у тому, щоб за заданими параметрами конструкції та умовами її експлуатації (зовнішні навантаження, температура тощо) зробити висновок: чи здатна конструкція працювати протягом визначеного терміну, чи ж вона вийде з ладу раніше.

Завдяки такому підходу можна передбачити, через який проміжок часу наявні мікротріщини можуть перетворитися на макротріщини, а ті, своєю чергою, — на головну руйнівну тріщину. Це дозволяє керувати залишковим ресурсом машини шляхом регулювання навантаження на її елементи.

Однак сучасний рівень розвитку механіки тріщин, а також механіки руйнування загалом, потребує попередньої систематизації та аналізу вже наявних знань у цій сфері. Теорія руйнування — це не вузькоспеціалізована наука, а міждисциплінарна галузь, якою користуються фахівці різних напрямів. Через це дослідження ведуться за різними методами й підходами. Це видно навіть у різноманітті критеріїв руйнування, що пояснюють перехід системи до нестабільного стану. У наш час проблема оцінювання залишкового ресурсу існуючих конструкцій часто є важливішою за розробку нових. Це підтверджується тим, з якою інтенсивністю сьогодні розвивається теорія руйнування.

1 ПРИЧИНИ АВАРІЙ ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНИХ МАШИН

Підйимально-транспортне обладнання є важливою складовою промислових підприємств різних галузей: металургійної, машинобудівної, гірничої, будівельної тощо. Воно необхідне для виконання навантажувально-розвантажувальних, монтажних операцій, а також під час роботи з важкими або габаритними об'єктами та матеріалами. Наразі більшість такого обладнання на українських заводах — це машини, які експлуатуються вже десятки років. Їх демонтують здебільшого через те, що їхні технічні характеристики вже не відповідають зростаючим вимогам виробництва: недостатня вантажопідйомність, надмірні габарити, зростання кількості поломок, збільшення витрат на утримання та ремонт. Проте демонтаж супроводжується значними витратами не лише на закупівлю нового обладнання, а й через зупинку виробничого процесу, що іноді обходиться дорожче, ніж черговий ремонт чи підтримання хоча б мінімального рівня працездатності. Такий підхід керівництва іноді призводить до серйозних наслідків, зокрема аварій, пов'язаних із незадовільним технічним станом кранів. Хоча зовні металоконструкції, особливо ті, що працюють у щадному режимі, можуть виглядати справними, з кожним роком ризик аварій стає все вищим. Ця загроза, як буде розглянуто далі, пов'язана з накопиченням втомних пошкоджень металу, що зрештою веде до його руйнування.

Окрім того, крани — як вітчизняні, так і імпортовані — були виготовлені в різні роки зі сталей різного складу, що обумовлює конструктивні особливості кожної моделі. Через це персонал, відповідальний за технічний контроль і обслуговування, часто стикається з труднощами у підтриманні їх у справному стані.

Причини аварій підйимально-транспортного обладнання можуть бути різноманітні, одна з головних — поява втомних тріщин у конструктивно слабких зонах кранів. Особливу небезпеку становить крихке руйнування, яке

іноді сприймається як непередбачувана випадковість. Це обумовлено двома чинниками. По-перше, крихке руйнування відбувається раптово, при навантаженнях, що є значно нижчими від розрахункових, без видимих попереджень, таких як пластичні деформації. По-друге, на сьогодні відсутні надійні методи прогнозування здатності конструкцій протистояти цьому типу руйнування. Ускладнення аналізу зумовлене тим, що метал має подвійну природу — крихку і в'язку, яка проявляється в залежності від умов: геометрії, температури, структури, хімічного складу тощо. Наприклад, один і той самий метал може демонструвати крихку або в'язку поведінку залежно від температури чи товщини.

Крихке руйнування зазвичай має дві стадії. Перша — це зародження тріщини, що часто виникає внаслідок повторно-змінних навантажень і має прихований характер. Друга — стрімке поширення тріщини по конструкції, що призводить до несподіваного обвалу.

Одним із ключових чинників, що сприяють такому руйнуванню, є температура експлуатації крана. Чим нижча температура, тим менша опірність матеріалу до крихкого руйнування. Короткочасні ударні навантаження ускладнюють пластичну деформацію в зонах концентрації напружень, що сприяє появі тріщин. Періодичні навантаження створюють передумови для розвитку прихованих втомних тріщин, які згодом стають причиною крихкого руйнування.

Якість сталі відіграє визначальну роль у запобіганні таким руйнуванням. Вона залежить від хімічного складу та технології виробництва. Найбільш шкідливими домішками в сталі вважаються сірка, фосфор, азот. Підвищений вміст вуглецю (більше 0,25%) також підвищує схильність до крихкого руйнування. За однакової якості прокату, листи більшої товщини є менш стійкими: при товщині до 6 мм ризик руйнування мінімальний, а для металу товщиною понад 10 мм — значно вищий.

У процесі виготовлення конструкцій певні технологічні операції можуть знижувати їхню опірність до крихкого руйнування. До таких

операцій належать зварювання, згинання, різання, правка. У результаті можуть з'являтися локальні концентрації напружень — підрізи, непровари, мікротріщини, а також збільшення зерна металу.

У зварних конструкціях дефекти можуть з'являтися ще на етапі виготовлення через недосконалість технологій та проєктні недоліки. Особливо небезпечні тріщини в самому зварному шві або в прилеглий до нього зоні. На відміну від клепаних з'єднань, у зварних тріщина здатна безперешкодно поширюватись на основний метал, уражаючи весь переріз, причому часто з великою швидкістю.

Найбільш ймовірні зони виникнення тріщин у зварних конструкціях:

- елементи з різкою зміною поперечного перерізу;
- стики розтягнутих частин при перпендикулярному розміщенні швів до напрямку зусилля;
- вузли з'єднання різних елементів;
- місця стику накладок, ребер, діафрагм;
- перевантажені зварюванням вузли, що містять багато допоміжних елементів, які не беруть участі в сприйнятті навантаження, але сприяють концентрації напружень (наприклад, ребра жорсткості).

2 ЗОНИ РИЗИКУ ПОЯВИ ТРІЩИН В ЕЛЕМЕНТАХ КРАНОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

2.1 Кінцеві балки

Головними недоліками кінцевих балок є численні тріщини, які виникають у зонах кріплення кутових брукс (див. рисунок 2.1). Поява тріщин, залежно від варіанту конструкції, чітко обмежується конкретними ділянками.

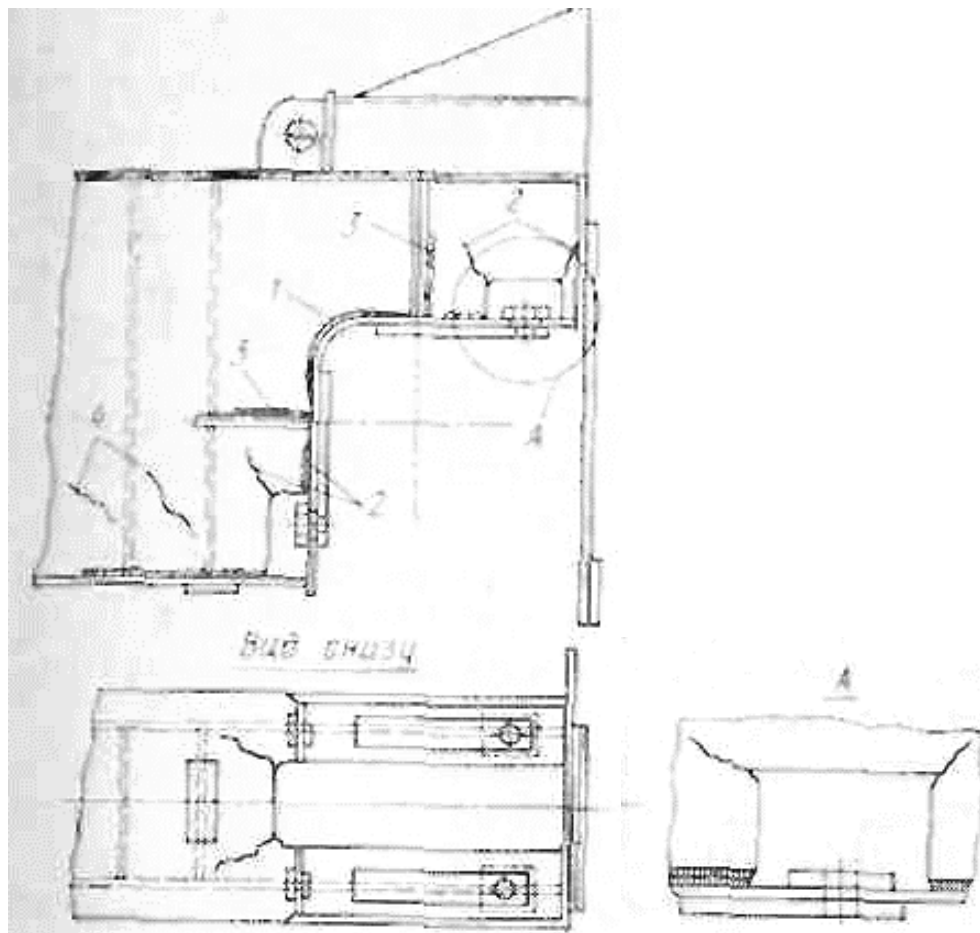


Рисунок 2.1 – Зони ризику руйнування кінцевих балок.

Перша зона – це зварне з'єднання між вертикальною стінкою та нижнім поясом. Дуже часто тріщини, що з'являються у шві, переходять на основний метал конструкції.

Друга зона – це вхідні кути вирізів. У вертикальних стінках до небезпечних ділянок належать вирізи, призначені для болтових з'єднань букс. У цих кутах зазвичай зароджуються тріщини 2, які згодом вражають основний метал стінки.

Третя зона – це ребра жорсткості, що підсилюють стінку. Руйнування зазвичай починається з появи тріщини 3 у місці кріплення краю ребра до пояса. Далі тріщина поширюється на шов, яким стінка з'єднана з поясом, а потім переходить на основний метал. У більшості випадків ребра жорсткості слугують початковими точками руйнування балки.

Четверта зона – тріщини 4 в основному металі вертикальної стінки. Вони зазвичай з'являються на відстані 100–150 мм від вертикального пояса в зонах, де встановлені діафрагми.

Усі описані дефекти, незалежно від їх розташування, мають спільні характеристики. По-перше, більшість таких тріщин є наскрізними, і методи їх усунення — зокрема механічна обробка з подальшим зварюванням — зазвичай не дають бажаного результату. По-друге, поява тріщин не призводить до миттєвого руйнування всієї балки.

2.2 Головні балки

У верхньому поясі найбільш піддана руйнуванню зона під стиком рейки.

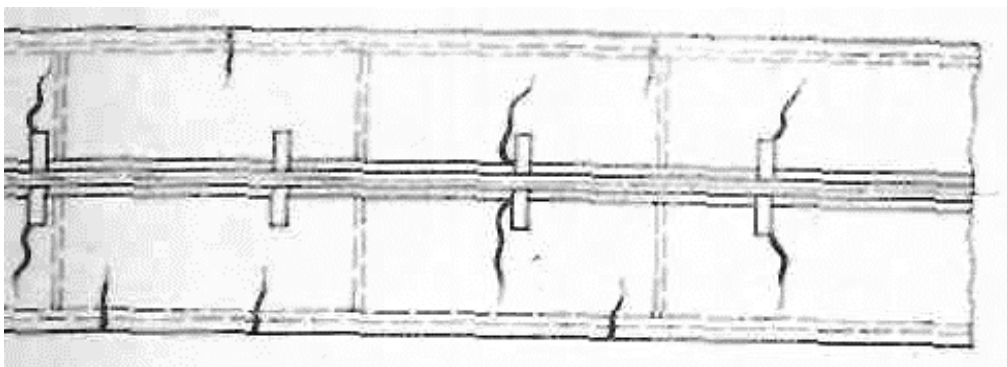


Рисунок 2.2 – Руйнування верхнього пояса.

У місцях з'єднання тріщини виникають у зонах приварювання деталей, які фіксують рейку, та поширюються по всьому перерізу пояса (див. рисунок 2.2). Іншими потенційно небезпечними зонами щодо появи тріщин є ділянки, де до пояса приварені різні елементи.

У нижньому поясі головною небезпечною ділянкою з точки зору руйнування є місце, де змінюється висота балки, що розташоване безпосередньо біля опорного вузла кріплення.

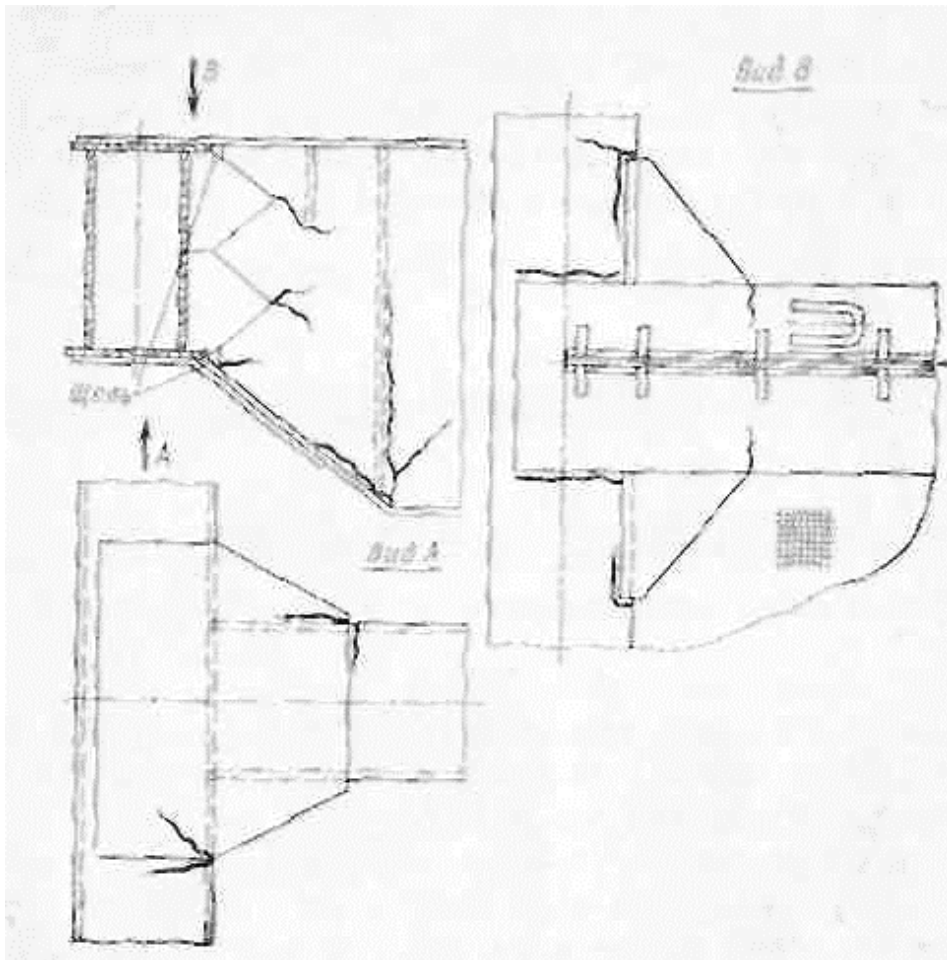


Рисунок 2.3 – Руйнування вузла з'єднання головної і кінцевої балок.

Тріщини виникають у зварному шві, що з'єднує пояс зі стінкою, в районі перегину пояса, і далі поширюються на основний метал (див. рисунок 2.3). На початковому етапі тріщина спрямована перпендикулярно до пояса, однак на відстані 100–150 мм вона розгалужується. Один з відгалужень

продовжує рости вертикально, інший — під кутом приблизно 45° до горизонтальної осі. Іноді тріщина переходить зі зварного шва в основний метал нижнього пояса.

Вертикальні стінки зазнають руйнування через приварювання до них різних конструктивних елементів (див. рисунок 2.4). У більшості випадків тріщини з'являються в місцях кріплення кронштейнів, які слугують опорами для робочих площадок.

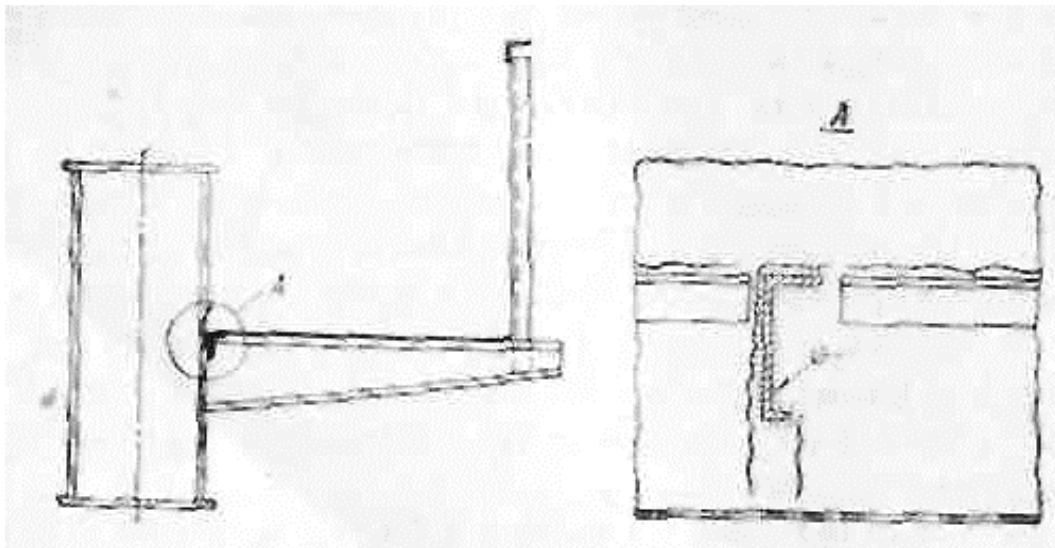


Рисунок 2.4 – Руйнування стінок у місцях кріплення кронштейнів.

Тріщини виникають у стінці безпосередньо біля зварного шва, яким прикріплено кронштейн. Далі вони поширюються в горизонтальному напрямку, що зумовлено наявністю поздовжніх швів, якими настил з'єднаний зі стінкою. Тріщини можуть досягати значної довжини. Під час руху моста крана, внаслідок коливань площадки, спостерігається розширення тріщин.

3 МЕХАНІКА РУЙНУВАННЯ

3.1 Введення в механіку руйнування

Протягом останніх десятиліть склався і активно розвивається новий напрям у механіці твердих тіл — механіка руйнування. Під цим поняттям розуміється дослідження умов, за яких виникають і поширюються макротріщини в навантажених конструктивних елементах до моменту їх повного руйнування.

Суть завдання полягає в тому, що мається конкретна конструкція (наприклад, будівля або судно) і відомі умови її експлуатації (зовнішні навантаження, температурні режими). Потрібно зробити висновок — чи зможе ця конструкція безвідмовно працювати протягом визначеного терміну, або ж вийде з ладу одразу.

Багато аварій траплялися при відносно низьких рівнях напруження. Пояснення цьому дали дослідження британського вченого Гріффітса (1921), який висунув гіпотезу про наявність у кожному твердому тілі мікроскопічних тріщин, що можуть або збільшуватись під навантаженням, або залишатися незмінними.

У разі відсутності в матеріалі будь-яких внутрішніх дефектів, фізики, спираючись на характер міжатомних зв'язків, встановили, що його теоретична міцність досягає лише 10–20% від модуля пружності E . Наприклад, для скла при $E = 70\,000$ МПа, теоретичне значення міцності має бути в межах 7000–14 000 МПа, що у 100 разів перевищує фактичну (технічну) міцність, отриману шляхом випробувань.

У сфері проєктування та експлуатації несучих елементів машин і механізмів існують два головних завдання: перше — знаходження

оптимальних форм і геометричних параметрів конструкцій, друге — передбачення терміну їхньої служби. Перше завдання зазвичай вирішується засобами класичної механіки, тоді як друге вимагає залучення принципів механіки руйнування, яка спирається на теорію пружності, опір матеріалів та будівельну механіку. Руйнування розглядається як процес незворотної зміни стану твердого тіла в часі. У класичній механіці часовий фактор ігнорується — рух може розглядатися і вперед, і назад у часі. Натомість для опису еволюційних процесів, таких як руйнування, необхідно враховувати напрям часу. Сам процес руйнування є безперервним розвитком пошкоджень, починаючи з моменту дії зовнішніх факторів і до остаточного виходу з ладу, що визначає довговічність конструкції.

Такий підхід до аналізу стану конструкцій, заснований на експериментальних даних про фізичні, хімічні та механічні властивості матеріалів, дозволив механіці руйнування зайняти ключову позицію в задачах прогнозування строку служби різних машин і конструкцій.

Механіка руйнування вивчає, як тверді тіла руйнуються під впливом різних енергетичних впливів — механічних, теплових, хімічних тощо. Під самим процесом руйнування мають на увазі дві основні стадії:

1. локалізоване пошкодження або часткове руйнування, яке відбувається через накопичення мікрodefektів, пор, мікротріщин, що врешті призводить до появи магістральних тріщин;
2. глобальне руйнування — зростання цих магістральних тріщин до критичного рівня, після чого відбувається остаточне руйнування зразка (розрив, розлам, розщеплення тощо).

Знання фізичних і механічних процесів, що лежать в основі руйнування, дозволяє вирішувати також зворотне завдання — створення конструкцій із заданими характеристиками довговічності.

Механіка руйнування, як і будь-яка інша наукова дисципліна, що динамічно розвивається, потребує регулярного впорядкування й узагальнення ключових термінів і законів. Основна складність при створенні

такого огляду полягає в різноманітності наукових підходів, які враховують реальні умови експлуатації. Також варто зазначити, що дослідження в цій галузі ведуться не тільки в рамках основної науки, а й у суміжних напрямках, що ускладнює визначення їхньої наукової значущості. Тому доцільно зосередити увагу на основних критеріях і постійних характеристиках руйнування твердих тіл, а також на практичних результатах наукових досліджень.

3.2 Реальні матеріали й конструкції

Реальні матеріали, а тим більше конструкції, ніколи не є повністю однорідними. Уже самі процеси виготовлення матеріалів і створення конструкцій призводять до появи неоднорідностей у структурі матеріалу або виробу, а також до включень, що виникають з технологічних причин. Внаслідок цього металеві конструкції ще на етапі виробництва мають певний ступінь пошкоджень і не являють собою цілісного однорідного масиву.

При впливі на такий неоднорідний матеріал поле напружень також набуває неоднорідного характеру, що призводить до виникнення зон концентрації напружень біля структурних чи геометричних дефектів, створюючи умови для зародження й розвитку тріщин. У реальних матеріалах тріщини виникають не випадково, а переважно в певних ділянках — наприклад, уздовж кристалічних меж, між площинами розшарування або поблизу включень. Залежно від прикладених навантажень і швидкості розповсюдження, тріщина радше розділяє молекулярні ланцюги або міжзернові зв'язки, ніж повністю їх руйнує.

Отже, в реальному матеріалі досягнення мікромеханічної рівноваги в принципі неможливе. Крім того, часто відсутня і хімічна рівновага через постійне протікання різних хімічних реакцій — зокрема, окиснення та взаємодію з навколишнім середовищем. При цьому механічна нестабільність лише посилює хімічні процеси, які самі по собі не є визначальними у

втомному руйнуванні, але супроводжують його. Усе це ще раз свідчить про те, що процес руйнування слід аналізувати комплексно, враховуючи як механічні, так і хімічні властивості матеріалу.

3.3 Масштабний фактор у теорії руйнування

Відомо, що властивості втоми та крихкого руйнування залежать від розміру зразка, тобто мають місце масштабні ефекти. Така залежність механічних характеристик від розмірів зразка або деталі ускладнює застосування результатів випробувань дрібних зразків для визначення міцності у повномасштабних елементах. Розбіжність у показниках міцності між малими і великими зразками стала однією з причин необхідності введення підвищених коефіцієнтів запасу міцності.

Попри велику кількість дослідницьких і теоретичних праць, питання масштабного фактору залишається відкритим. Немає єдиного уявлення про його природу: чи є це властивістю самого матеріалу змінювати свої міцнісні характеристики залежно від розміру, чи це наслідок інших чинників?

Згідно з даними численних досліджень, збільшення розмірів зразка або деталі зазвичай призводить до зниження міцності при ударних навантаженнях, циклічних навантаженнях і в умовах корозійного впливу. Масштабний ефект проявляється також у ситуаціях термічної втоми та подібних умовах.

У разі дії циклічних навантажень виявлено такі закономірності щодо впливу абсолютних розмірів зразків і концентрації напружень на їхню втомну міцність:

1. Із збільшенням розміру зразків або деталей межа втоми знижується. Виразність масштабного ефекту залежить від форми виробу й наявності концентраторів напруження. Найбільше зниження межі втоми сталі спостерігається при збільшенні діаметра зразка від 5 до 25–50 мм; подальше збільшення розміру дає менший ефект.

2. Масштабний ефект посилюється із зростанням міцності сталі та збільшенням неоднорідності матеріалу.

3. Ефективний коефіцієнт концентрації напружень збільшується разом із розмірами зразка, прагнучи до теоретичного значення цього коефіцієнта.

4. Чутливість до масштабного ефекту підвищується при збільшенні градієнта напружень, особливо це характерно для високоміцних сталей.

Ці закономірності встановлено на основі випробувань зразків діаметром до 200 мм, проведених різними дослідниками.

Серед науковців існують різні погляди на природу масштабного ефекту, які можна згрупувати наступним чином:

- Перша група дослідників пов'язує вплив абсолютних розмірів зразків на міцність із технологічними й механічними чинниками, зокрема посиленням неоднорідності властивостей матеріалу та навантаження зі збільшенням розмірів.

- Друга група пояснює це статистичним підходом: впливом випадкової неоднорідності в структурі металу.

- Третя група обґрунтовує ефект з позицій енергетики — більшого запасу пружної енергії у зразках великого об'єму.

- Четверта група вказує на порушення умов геометричної подібності під час випробувань зразків різних розмірів.

Найбільш переконливими вважаються технологічні та механічні фактори. І. А. Одінг виділив п'ять основних причин, якими дослідники обґрунтовували вплив абсолютних розмірів зразків на їхню циклічну міцність:

1. Відмінності у якості металу заготовок різних розмірів, навіть за однакових умов термічної та механічної обробки. При цьому статична міцність може залишатися однаковою.

2. Наявність градієнтів напруження через нерівномірний розподіл навантажень у перетині зразка чи деталі.

3. Неоднорідність механічних властивостей і напружень у мікроскопічних об'ємах металу.
4. Вплив технології виготовлення зразків.
5. Сумарна дія циклічної в'язкості та розмірів зерен, що по-різному проявляється в зразках різного розміру.

Результати експериментів підтверджують, що технологічні та механічні чинники суттєво впливають на залежність циклічної міцності металів від розміру зразків. У різних металів ця залежність виражається по-різному. Наприклад, межа втоми деяких високоміцних сталей є дуже чутливою до навіть незначних змін режимів термічної обробки, що можуть виникати при обробці прутків різного діаметра. Для м'яких вуглецевих сталей така чутливість менша.

Також слід враховувати, що виготовлення зразків може впливати на їхню втомну міцність. Це пов'язано з виникненням залишкових стискуючих напружень у поверхневому шарі внаслідок механічної обробки (різання).

Ці напруження вважаються однією з основних причин залежності межі втоми від розміру зразка. Водночас ця точка зору зазнає критики, оскільки масштабний ефект також пов'язують з різним ступенем критичної деформації поверхневого шару залежно від діаметра зразка. Фактично, ступінь і глибина зміцнення поверхневого шару безпосередньо залежать від градієнта напружень.

Роль градієнта напружень у масштабному ефекті пояснюється тим, що при однакових напруженнях у поверхневому шарі зразок з більшим діаметром має менший градієнт напруження через неоднорідний розподіл напружень по його перетину.

3.4 Непрогресуючі дефекти

У деяких випадках у зонах концентрації напружень після певної кількості циклів виникають втомні тріщини. Спочатку вони розвиваються досить швидко, однак згодом їхнє зростання може сповільнитися або навіть зупинитися до моменту остаточного руйнування конструкції. Такі тріщини часто з'являються в місцях механічних пошкоджень — як-от підрізи, подряпини, отвори тощо, а також у ділянках з'єднання різнорідних металів, біля виточок, канавок і змін у поперечному перерізі.

Крім того, тріщини можуть утворюватися внаслідок недоліків виробничого процесу, наприклад, у зоні зварних швів, якщо ці ділянки зазнають значних напружень. При цьому немає принципової різниці, чи викликані ці напруження зовнішніми силами, чи є залишковими — результатом термічних процесів під час зварювання. Якщо ж механічні пошкодження малі за розміром і розташовані подалі від основних потоків сил, які сприймає конструкція (тобто не в місцях з високими напруженнями), тоді їхній ріст з часом може стабілізуватися, краї тріщини затуплюються, і подібні дефекти не мають істотного впливу на розвиток втомного руйнування.

Досвід дослідження механічного руйнування свідчить, що розвиток таких тріщин не є обов'язковим — на початкових етапах втомного процесу вони не становлять загрози, якщо не є критичними для конкретних умов навантаження. Механізм, який запобігає поширенню тріщин у подібних випадках, до кінця не з'ясований і складний для пояснення. Ймовірно, загальним механізмом, що стримує їхній ріст, є дисипація енергії.

Це явище можна також пояснити ефектом самозаліковування, що проявляється на початковій стадії руйнування. У втомленому матеріалі пошкодження вже є суттєвими, і штучні дефекти слугують джерелом зростання мікротріщин. Виходить, що механізм стримування тріщин працює

до певного критичного моменту — до того, як мікропошкодження починають зливатися у повноцінну тріщину. Цей висновок підтверджується також зменшенням енергії, що розсіюється, у міру зростання втоми матеріалу, що спостерігається під час тривалого навантаження.

Це має значення для інженерної практики: якщо на ранніх етапах експлуатації незначні механічні пошкодження не спричиняють руйнування, то з часом вони можуть стати критичними і призвести до швидкої відмови.

У разі тривалого (протягом кількох років) процесу втоми, для того щоб випадкові дефекти почали розростатися до граничних розмірів, напруження має досягти певного критичного рівня. Якщо цього не відбувається, розміри дефектів стабілізуються, і їхній подальший розвиток залежатиме вже від загального процесу деградації матеріалу.

Отже, втомні або випадкові тріщини завжди виступають концентраторами напружень, а їхній вплив як дефектів не залежить від довжини, форми зразка чи умов навантаження.

3.5 Теорія тріщин у механіці руйнування

Експериментальні дослідження, проведені Ж. Ірвіном, під час яких вивчали тріщини різної довжини, вимірювали руйнівне напруження, а далі за формулою (3.5.1) обчислювали коефіцієнт інтенсивності руйнування K_{IC} , засвідчили, що значення цього коефіцієнта є сталою величиною для матеріалу і не залежить від довжини тріщини.

$$K_{IC} = \sigma_C \sqrt{\pi l} \cdot F(l, b), \quad (3.1)$$

де $F(l, b)$ - поправочний коефіцієнт на обмежену ширину зразка b .

Розмірність коефіцієнта K_{IC} $МПа \cdot м^{\frac{1}{2}}$ або $Н/м^{\frac{3}{2}}$. Якщо для матеріалу знайдене значення K_{IC} то, при відомій напівдовжині тріщини l_c , можна легко визначити руйнівне напруження

$$\sigma_c = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi l_c} \cdot F(l_0 b)}. \quad (3.2)$$

Ця формула пояснює різне поведіння тріщини: або стійка рівновага, або лавинообразне поширення.

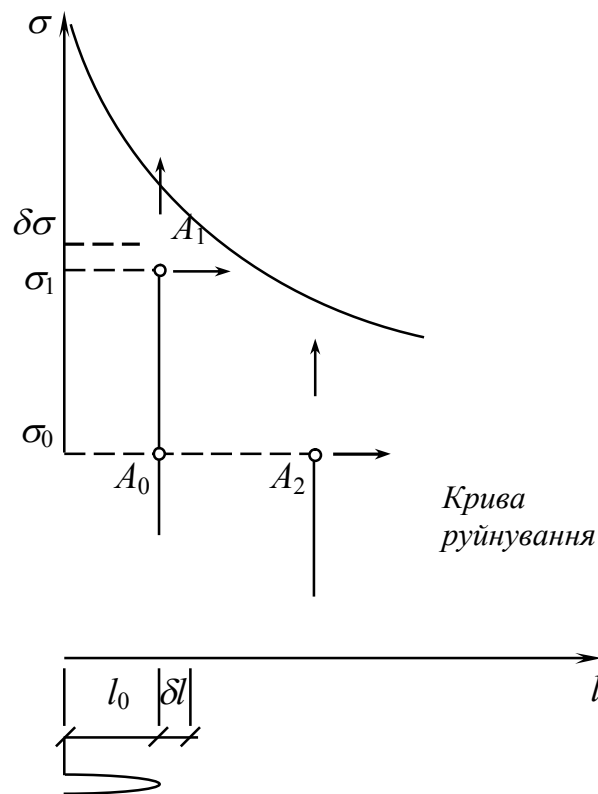


Рисунок 3.1 – Крива критичного руйнування

Нехай є тріщина довжиною $2l_0$ і діє напруження σ_0 таке, що точка, що відповідає їм A_0 в осях σ, l лежить нижче кривої руйнування (рисунок 3.1).

Тоді будь-які випадкові варіації в напруженні $\delta\sigma$ або в довжині тріщини δl не викличуть прогресуючого росту тріщин.

Інша справа, якщо напруження виросте до значення σ_1 ; відповідна точка A_1 (або точка A_2 у результаті підростання довжини тріщини) виявиться на кривій руйнування або близько до неї. У цьому випадку рівновага хитка й навіть малі варіації $\delta\sigma$ або δl призводять до миттєвого росту тріщини й, отже, до руйнування.

3.6 Зрушення й ріст тріщини

Лінійна механіка руйнування, як інструмент для прогнозування моменту виникнення руйнування, є одним із найважливіших і найкорисніших напрямів у теорії руйнування. Існують обґрунтовані експериментальні методики та дані про властивості конкретних матеріалів, які дозволяють оцінювати їхню придатність до експлуатації.

Як уже зазначалося раніше, основним показником тріщиностійкості матеріалу є коефіцієнт KIC — критичний коефіцієнт інтенсивності напружень. У науковій літературі наведені значення KIC для різних сталей та сплавів.

Розглянемо пластину зі сталі, яка має початкову тріщину довжиною $2l$, розташовану перпендикулярно до напрямку розтягу і яка проходить крізь увесь зразок (див. рисунок 3.2).

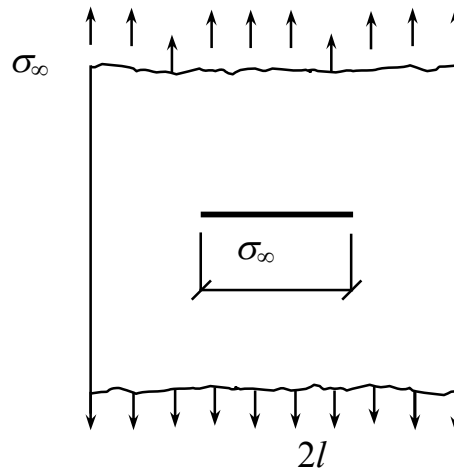


Рисунок 3.2 – Розтяг зразка руйнівним напруженням σ_{∞} .

Довжина l мала в порівнянні із шириною пластини, а в порівнянні з товщиною велика. Задано $K_{IC} = 40 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{\frac{1}{2}} = 40 \text{ МН} \cdot \text{м}^{-\frac{3}{2}}$; $\sigma_T = 620 \text{ МПа}$; $\sigma_{\infty} = 200 \text{ МПа}$. Потрібно визначити початкову довжину тріщини l , при якій вона зрушує й росте. Тут σ_{∞} – напруження руйнування.

$$l = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{\infty}} \right)^2 = \frac{1}{3,14} \left(\frac{40}{200} \right)^2 = 0,013 \text{ м} = 1,3 \text{ см} \quad (3.3)$$

Для застосування лінійної механіки руйнування повинна виконуватися нерівність

$$l \geq 2,5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_T} \right)^2, \quad (3.4)$$

порівнюючи

$$l = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{\infty}} \right)^2 \geq 2,5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_T} \right)^2, \quad (3.5)$$

одержимо

$$\sigma_{\infty} \leq \frac{\sigma_T}{\sqrt{2,5\pi}} = 0,3357\sigma_T = 221. \quad (3.6)$$

У розглянутому завданні σ_{∞} не повинно перевищувати 221 МПа, що виконано.

Наведений, дуже простий приклад показує можливість руйнування конструкції при дії досить низьких напружень $\sigma_{\infty} = 0,32 \sigma_T$. Очевидна також і практична спрямованість методів механіки руйнування, пов'язана з рішенням проблеми вибору матеріалу, проектуванням і експлуатацією конструкцій, забезпеченням їхньої надійності й працездатності:

1. Введення норм прийому, заснованих на встановленні максимуму розмірів зони дефекту (початкових тріщин) для оцінки придатності конструкцій для експлуатації.
2. Обґрунтування режимів дефектоскопічного контролю при оцінці якості об'єкта.

3.7 Особливості будови втомних зломів

Зломи є прямим наслідком порушення цілісності матеріалу і водночас відображають історію процесу руйнування, подібно до фотографічного знімка. Фрактографічні дослідження набули особливої важливості під час вивчення втомних зломів завдяки характерним ознакам їх поверхні. Ще в перших роботах Д. Н. Відмана було зазначено, що при втомному руйнуванні на поверхні зламу можна виділити дві зони: одна — дрібнозерниста, іноді з порцеляною структурою або з блискучим, шліфованим виглядом, інша — з волокнистою текстурою.

Перша зона, названа зоною втомного руйнування, утворюється поступово, а швидкість її формування залежить від рівня навантаження. За

високого перевантаження ця зона швидко переходить у другу — зону статичного руйнування, яка виникає зазвичай протягом одного або кількох циклів навантаження.

Форма втомного зламу визначається переважно трьома чинниками:

1. типом навантаження, що спричиняє появу та розвиток втомної тріщини;
2. опором деталі до руйнування, який залежить від її геометрії, властивостей матеріалу та стану поверхні;
3. впливом зовнішніх умов.

Оскільки вид втомного зламу в основному визначається рівнем номінального напруження, Д. Н. Відман запропонував таку класифікацію зломів:

1. Злам від циклічного перевантаження.
2. Власне втомний злам.
3. Передчасний втомний злам.

У першому випадку зона втомного руйнування або відсутня зовсім, або є дуже малою. У проміжному варіанті спостерігаються обидві зони — втомна й статична. При передчасному втомному зламі теж наявні обидві зони, але втомна зона має характерну шарувату й східчасту структуру.

За даними І. А. Одінга, при значних циклічних перевантаженнях вся площа зламу може належати до зони статичного руйнування, тоді як при втомному зламі основну частину становить зона втомного руйнування. Одінг вперше систематизував і узагальнив наявні знання про структурні ознаки втоми металів.

Я. Б. Фрідман виділяє на втомному зламі такі п'ять зон:

1. Фокус зламу — мікроскопічна точка його виникнення.
2. Зона зародження — макроскопічне місце початку руйнування.
3. Область вибіркового росту тріщини, яка зазвичай займає майже всю площу зони втомного руйнування.

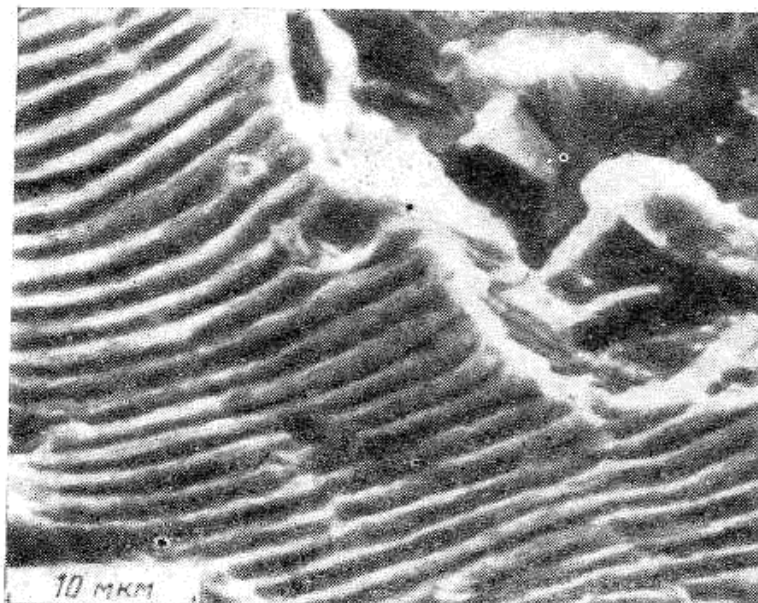
4. Область прискореного росту тріщини, яка передуює остаточному зламу.
5. Зона остаточного руйнування (долом).

Довгий час вважалося, що вигляд поверхні втомного зламу визначається характером контакту між стінками тріщини. Якщо напруження змінює знак, тріщина періодично відкривається і закривається, внаслідок чого її поверхні труться і зношуються одна об одну. З цієї точки зору пояснювали, зокрема, появу гладкої поверхні зламу при невеликих напруженнях, які лише трохи перевищують межу втоми. В таких умовах деталь витримує велику кількість циклів, що супроводжуються зминанням і стиранням.

Проте Р. С. Миколаєв навів аргументи, що гладкість поверхні може виникати не лише через механічне тертя між стінками тріщини. На його думку, важко уявити значне тертя в середині мікротріщини у великогабаритній деталі. Відтак, гладкий вигляд зламу, найімовірніше, зумовлений особливостями механізму його утворення.

Це підтверджується тим, що припущення про вирішальне значення тертя суперечить наявності специфічних смуг на поверхні втомного зламу, які отримали назву слідів фронту втомної тріщини (див. рисунок 3.7.1).

Рисунок 3.3 – Характер мікрорельєфу руйнування



Існують різні погляди щодо причин виникнення втомних смуг на зломах. Зокрема, вважається, що ці смуги з'являються через перерви в навантаженні (періоди відпочинку) при незначному пластичному деформуванні матеріалу в області вершини тріщини. Деякі дослідники пов'язують появу таких ліній з впливом пластичної деформації в зоні вершини тріщини за умов високих навантажень. За іншими джерелами, втомні смуги утворюються через зміцнення дна тріщини під час експлуатації деталі при підвищених або знижених рівнях напруження. При цьому вважається, що на шляху просування тріщини виникає зміцнений шар металу, руйнування якого й фіксується у вигляді втомних ліній.

Також висувалися припущення, що однією з причин формування втомних смуг може бути подолання тріщиною особливо міцних перешкод. Крім того, деякі теорії пояснюють утворення втомних смуг дією максимальних дотичних напружень. У зонах концентрації напруження формуються пучки ліній ковзання, серед яких по одному з них зароджується початкова тріщина. Після цього виникають нові пучки ковзання. Сліди, які залишає фронт втомної тріщини, є наслідком її зупинок.

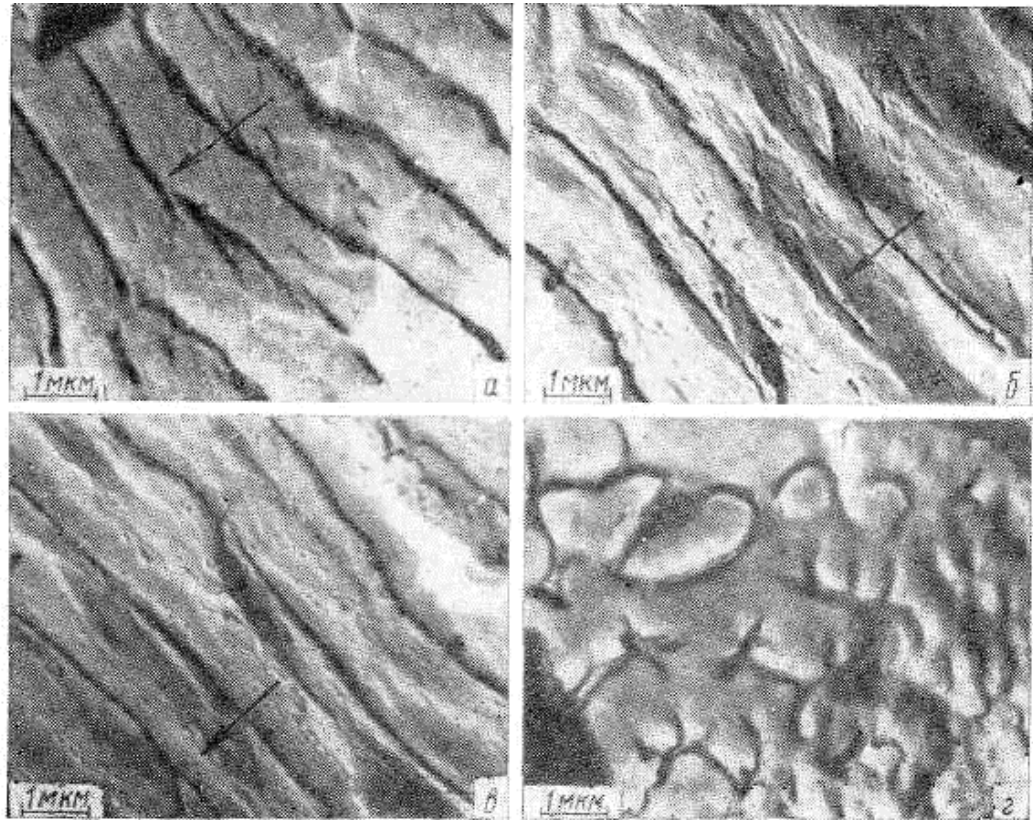


Рисунок 3.4 – Фрактографія втомного руйнування (а – зона стабільного розповсюдження тріщини; б, в – зона прискореного росту тріщини; г – зона остаточного зламу).

Наявність слідів фронту тріщини на поверхні втомного зламу дає змогу зробити суттєві висновки щодо розташування зони руйнування, особливостей розвитку втомної тріщини, кількості перевантажень та моментів зупинки її поширення. Однак, єдиної думки щодо природи утворення втомних ліній та різноманітної шорсткості наразі не існує. У результаті дослідження мікрорельєфу поверхні втомного руйнування сталей вдалося виділити три основні зони (рисунок 3.3):

1. зону стабільного росту тріщини, яка характеризується присутністю мікросмуг, орієнтованих перпендикулярно до напрямку її поширення;
2. зону прискореного росту тріщини, що має змішаний мікрорельєф, представлений мікросмугами та «ямками»;
3. зону остаточного зламу.

Отже, розвиток втомної тріщини проходить у три етапи. У першій зоні її поширення відбувається з мінімальними пластичними деформаціями, тоді як у зоні прискореного росту ступінь пластичної деформації поступово зростає разом із довжиною тріщини, досягаючи максимуму в момент остаточного руйнування.

3.8 Зміна фізичних властивостей металів у процесі циклічного навантаження

1. Під впливом циклічних навантажень у матеріалі відбуваються незворотні фізичні процеси, що вже з перших циклів призводять до послаблення кристалічної решітки.

2. Ослаблення зв'язків між атомами пов'язане зі зростанням кількості дефектів у кристалічній решітці. Основним чинником цього є збільшення густини дислокацій із підвищенням кількості циклів навантаження, що підтверджується результатами мікроструктурного аналізу. При цьому зростання дислокаційної густини закономірно призводить до підвищення таких показників статичної міцності, як межа міцності, твердість тощо, що свідчить про наявність стадії зміцнення внаслідок деформації, яка передуює фазі виникнення і розвитку субмікроскопічних порушень цілісності.

3. Субмікроскопічні порушення цілісності виникають у тих локальних ділянках металу, де досягнуто критичного рівня густини дислокацій.

4. Акумуляція субмікроскопічних дефектів у цих локальних обсягах призводить до поступового погіршення структурно чутливих властивостей, таких як мікротвердість, крихка міцність, магнітна проникність тощо. У цей період також спостерігається різке падіння модуля пружності, зумовлене не лише ослабленням, а й частковим руйнуванням міжатомних зв'язків.

5. Після накопичення пошкоджень настає стадія безпосереднього руйнування — виникнення і розвиток мікротріщин, які з часом переростають у макротріщини. У цей період спостерігається значне зниження міцності та пластичності матеріалу.

4 КРИТЕРІЇ РУЙНУВАННЯ

4.1 Різноманітність критеріїв руйнування

Велика кількість наукових даних у галузі механіки руйнування твердих тіл вимагає системно-структурованого підходу до їх аналізу. Необхідно сформувати дослідницьку методологію, чітко визначити предмет дослідження, термінологічний апарат тощо. У науковій літературі подібні комплексні дослідження майже відсутні, тому узагальнення у межах механіки руйнування, як і в більшості сучасних наукових напрямків, можливі лише в обмежених рамках.

Подальший розвиток загальної механіки руйнування твердих тіл дозволить точніше формувати основні принципи щодо критеріїв руйнування, матеріальних сталих і прогнозування довговічності механічних систем.

Наявні критерії руйнування ще не повністю відображають складність відповідних процесів і механізмів. Для їх адекватного опису необхідно залучати принципи і методи термодинаміки, зокрема термодинаміки незворотних процесів, а також створювати нові критерії, які більш повно враховують особливості руйнування.

Від часу зародження науки про міцність однією з головних задач було визначення параметрів, які б характеризували міцність твердого тіла. Зі зростанням знань про будову твердих тіл вдосконалювалися й методи оцінки.

Спочатку використовувалася модель ідеального, однорідного, пружного середовища без дефектів. Хоча така модель швидко була поставлена під сумнів, зокрема Кулоном, вона й досі актуальна завдяки зручності математичного апарату та придатності для практичних задач. У рамках «механічного» підходу критерії руйнування визначалися граничними значеннями відповідних механічних параметрів. Наприклад, Галілей

пропонував використовувати граничне головне нормальне напруження, Маріотт — граничне подовження, Кулон — головне дотичне напруження, а Бельтрамі — енергію пружної деформації.

З часом були відкриті явища, як-от масштабний ефект, залежність міцності від тривалості дії навантаження, пластичність, дисипація енергії тощо. Це вимагало внесення поправок у теорії, зокрема через коригувальні коефіцієнти.

Суттєві зміни в теорії міцності стали можливими після аналізу нових експериментальних даних, отриманих в умовах високих/низьких температур, значних швидкостей навантаження, циклічного та агресивного впливу середовища.

Ще за часів Кельвіна було з'ясовано, що межі міцності, пружності та текучості є змінними величинами, залежними від умов навантаження. Це викликало перегляд фізичної моделі твердого тіла, посилену увагу до теплового руху атомів та розвиток кінетичної концепції міцності. У цій теорії ключову роль відіграють енергетичні флуктуації, зумовлені хаотичним тепловим рухом. Хоча ця концепція набула поширення у фізиці твердого тіла, її практичне застосування залишається обмеженим через труднощі у визначенні сталих параметрів рівняння міцності.

З прикладної точки зору більш ефективними виявилися енергетичні критерії розвитку тріщин. Розроблена Гриффітом теорія була згодом доповнена Ірвіном, Орованом та іншими. Цей підхід виявився надзвичайно корисним для оцінки фізико-механічних властивостей матеріалів, зокрема у випадках тонкостінних конструкцій, де руйнування зазвичай відбувається через розвиток головної тріщини. За наявності відповідних характеристик матеріалу можна обчислити час її поширення і з прийнятною точністю спрогнозувати довговічність конструкції. Можна навіть підібрати режим навантаження або матеріал, за яких тріщина не буде розвиватися протягом певного часу. Однак метод не дозволяє точно визначити час появи тріщини, що є його серйозним недоліком. У реальних матеріалах дефекти існують з

моменту виготовлення, а довговічність залежить від часу розвитку сукупності дефектів до критичного стану.

Сучасні дослідницькі методи (рентгеноструктурний аналіз, акустична емісія, ІЧ-спектроскопія тощо) дозволяють оцінити пошкодження на різних етапах експлуатації. Але врахувати ці дані в загальному рівнянні стану — складне завдання.

Для інженерної практики також важливим є статистичний підхід, оскільки руйнування часто має ймовірнісний характер. Але для його застосування необхідна велика кількість експериментальних даних, що не завжди можливо.

На сьогодні найбільший потенціал має термодинамічний підхід у дослідженні довговічності в'язкопружних матеріалів. Він враховує внутрішню структуру матеріалу і дає змогу теоретично описати її зміну під впливом зовнішніх навантажень. З огляду на незворотний характер руйнування, найбільш доцільним є застосування термодинаміки незворотних процесів. Для визначення критеріїв локального руйнування часто використовують екстремальні значення термодинамічних функцій, таких як енергія чи ентропія. Також використовуються спеціальні характеристики, як-от пошкодження матеріалу, яке відображає зміну його фізичних властивостей на всіх структурних рівнях під дією навантаження. Проте через складність і невизначеність структури реальних матеріалів цей підхід погано придатний для розрахунків.

Існуючі критерії руйнування умовно поділяють на чотири групи: енергетичні, статистичні, кінетичні та термодинамічні. Такий поділ досить умовний, оскільки, наприклад, енергетичні критерії можуть використовувати термодинамічні величини. Це підкреслює складність і багатогранність процесів руйнування, що залежать від численних характеристик структури матеріалу.

У таблиці 1 критерії поділено на дві групи, що описують два етапи руйнування: дифузійне (розсіяне) руйнування, коли пошкодження

накопичуються по всьому об'єму до утворення мікротріщин, і глобальне руйнування, яке пов'язане з розвитком магістральних тріщин.

Серед критеріїв, поданих у таблиці, найбільш доцільними для оцінки довговічності в'язкопружних матеріалів є критерії, пов'язані з максимумом енергії, ентропії та пошкодження. Вони були широко досліджені для різних матеріалів та умов. Хоча кожен з них у певних ситуаціях дає задовільні результати, загальної переваги жодного з них не виявлено, що підтверджує думку про відсутність універсальних критеріїв руйнування.

Розглянемо ці критерії докладніше, починаючи з ентропійного. Його перевагою є здатність враховувати супутні процеси — дифузію, хімічні реакції тощо. Серед недоліків — не до кінця зрозумілий фізичний зміст критерію та складність вимірювання ентропії.

Енергетичний критерій Y -дисипативного типу стверджує, що руйнування настає при досягненні критичного значення енергії. Він є більш зручним через фізичну зрозумілість, можливість вимірювання та збереження енергії. Проте застосування Ψ -критерію, який також враховує супутні процеси, ще недостатньо досліджено, і дані щодо нього є суперечливими. Одним із його недоліків є складність розподілу поглинутої енергії на частини: власне на руйнування, на зміну структури без руйнування та на тепло.

Критерій пошкодження, який вказує на руйнування при досягненні критичного рівня пошкодження, має обмежене застосування через необхідність індивідуального підходу для кожного матеріалу. Наприклад, для гум використовують ІЧ-спектроскопію, для металів — акустичну емісію. Перевагою цього критерію є його надійність.

Найперспективнішим з точки зору наукових досліджень залишається енергетичний підхід. Останнім часом було розроблено чимало теорій, що оцінюють довговічність конструкцій через енерговитрати на втому та руйнування матеріалу. Однією з таких є структурно-енергетична теорія втоми, яку варто розглянути окремо.

4.2 Структурно-енергетична теорія втоми

При аналізі процесів втоми варто розрізняти наступні три періоди втоми (рисунок 4.2.1): інкубаційний період (I), період розвитку субмікроскопічних тріщин втоми до розмірів мікротріщин (II) і період розвитку мікротріщин до розмірів макротріщин (III). Всі ці періоди втоми розмежовуються на діаграмі втоми трьома лініями. Тут лінія ABC - лінія руйнування (крива Велера), лінія A'B'C' - лінія початку утворення субмікроскопічних тріщин і лінія A'C - лінія початку утворення мікротріщин.

Діаграма втомного руйнування дозволила встановити наступні нові критерії втоми:

1. Критичне число циклів N_K — число циклів, по досягненні якого при напруженні, рівному межі втоми, починають виникати субмікроскопічні тріщини.

2. Критичне напруження втоми σ_K — напруження, при якому руйнування настає за N_K циклів.

3. Наведене напруження руйнування α_t , чисельно рівне різниці між критичним напруженням і напруженням, що відповідає межі втоми, вираженої в дотичних напруженнях, $\alpha_t = (\tau_K - \tau_w)$.

4. Базове число циклів N_w - число циклів до руйнування при мінімальному напруженні (при якому ще може наступити руйнування).

5. Циклічна межа пружності σ_e^u — та максимальне напруження, при якому необоротні перекручування кристалічних ґраток не з'являються, як би не було велике число циклів навантаження.

Коефіцієнт живучості металу K , що характеризує, якою мірою змінюється довговічність при зміні напруження на одиницю, він відповідає тангенсу кута нахилу кривої руйнування $\sigma - \ln N$ до осі ординат (рисунок 4.1).

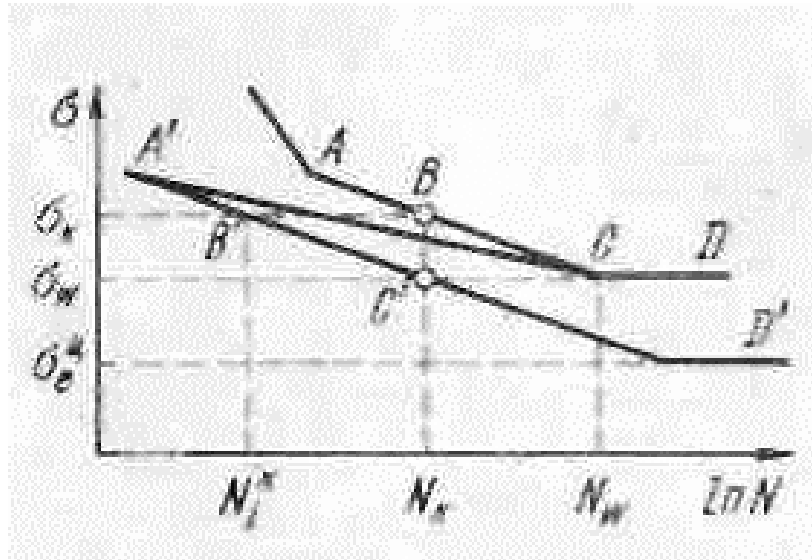


Рисунок 4.1 – Діаграма втоми металів

Аналізуючи діаграму втоми, можна зробити висновок, що на початковому етапі дії циклічного навантаження певної величини в металі відбувається накопичення пружних деформацій кристалічних ґраток (І стадія втоми). Згідно з даними електронно-мікроскопічних досліджень, на цьому етапі ще не спостерігається масових зсувів чи утворення субмікроскопічних тріщин. Втома матеріалу в цей період зумовлена накопиченням пружних спотворень кристалічної структури, що пов'язано зі зростанням густини дислокацій. Лише після досягнення критичної густини дислокацій у металі починають виникати субмікроскопічні тріщини, що пов'язано з інтенсивним зсувом у деяких зонах матеріалу. Руйнування міжатомних зв'язків, спричинене незворотними спотвореннями кристалічної решітки внаслідок масового виходу дислокацій на поверхню, знаменує початок локального руйнування металу (II стадія втоми — утворення й накопичення

субмікроскопічних тріщин). Якщо прикладене напруження має достатню амплітуду для подальшого розвитку цих тріщин до мікрорівня, то після певної кількості циклів настає III стадія втоми — розростання тріщини до повного руйнування.

Таким чином, сумарна питома енергія, витрачена на процес втоми в локальній області металу від початку дії навантаження до появи тріщини критичної довжини, складається з:

1. питомої енергії пружної деформації, яка витрачається на спотворення кристалічної ґратки до критичного рівня в I стадії втоми (нагромадження критичної густини дислокацій);

2. питомої енергії руйнування, яка йде на порушення міжатомних зв'язків у максимально спотворених зонах кристалічної решітки впродовж II та III стадій втоми.

Приймається, що загальна питома енергія, яка витрачається на процес втоми від початку дії циклічного навантаження до моменту руйнування, є сталою величиною для даного металу та не залежить від амплітуди прикладеного напруження. У такому разі для I стадії втоми при певному рівні напруження σ можна записати:

$$(A_u)_\sigma 2N = \text{const} = C_1, \quad (4.1)$$

а для II і III періодів втоми

$$(A_p)_\tau 2N = \text{const} = C_2, \quad (4.2)$$

де $(A_u)_\sigma$ — середня енергія «пружної» деформації, що запасасться за півцикл при заданому σ , віднесена до одиниці об'єму металу із гранично перекрученими кристалічними ґратками;

$(A_p)_\tau$ - середня енергія пластичної деформації, що витрачається на одиниці об'єму при просуванні тріщини за півцикл. Якщо дорівняти питому енергію граничного перекучування

$$C_1 = \int_{T_u}^{T_s} Cp dT, \quad (4.3)$$

і питому енергію руйнування при просуванні тріщини (енергію пластичної деформації)

$$C_2 = L_m, \quad (4.4)$$

то одержимо

$$(A_u)_\sigma 2N = \int_{T_u}^{T_s} Cp dT, \quad (4.5)$$

$$(A_p)_\tau 2N = L_m, \quad (4.6)$$

де $\int_{T_u}^{T_s} Cp dT$ й L_m виражені в кгс*мм/мм³.

Величини $(A_u)_\sigma$ і $(A_p)_\tau$ при $\sigma = \sigma_{до}$ можуть бути виражені як

$$(A_u)_\sigma = \frac{(\sigma_\omega - \sigma_e^y)^2}{2E} = \frac{\beta_\sigma^2}{2E}, \quad (4.7)$$

$$(A_p)_\tau = \frac{(\tau_k - \tau_w)^2}{2G} = \frac{\alpha_\tau^2}{2G}, \quad (4.8)$$

А тоді співвідношення (4.5) і (4.6) приймуть вигляд:

$$\frac{\beta^2}{2E} \cdot 2N_k = \int_{T_u}^{T_s} C_p dT, \quad (4.9)$$

$$\frac{\alpha_\tau^2}{2G} 2N_k = L_m, \quad (4.10)$$

Тут $\beta = \sigma_w - \sigma_e^u$; $\alpha_\tau = \tau_k - \tau_w$.

При напруженні, рівному критичному, спостерігається перегин або розрив кривих втоми. Це дозволило трактувати критичне напруження як напруження, при досягненні якого змінюється локальний напружений стан у вершини тріщини критичної довжини.

Спільне рішення їх дає

$$\frac{\alpha_\tau}{\beta} = \sqrt{\frac{L_m G}{\int_{T_u}^{T_s} C_p dT E}}, \quad (4.11)$$

Це співвідношення дозволяє при відомому α_τ визначати значення β .

Величина наведеного напруження руйнування визначається за даними обробки експериментальних кривих втоми, що полягає в наступному; будується залежність коефіцієнта живучості K , що характеризує тангенс кута (ϕ) нахилу прямої σ — $\ln N$ (на прямолінійній ділянці кривої втоми)

від базового числа циклів N_w , що характеризує вихід кривої втоми на горизонтальну ділянку.

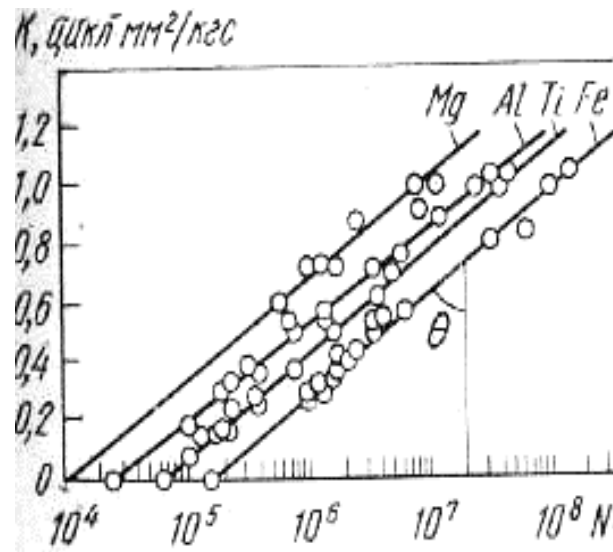


Рисунок 4.2 – Залежність коефіцієнта живучості K від базового числа циклів N_w для магнію, алюмінію, титану, заліза і їхніх сплавів.

Паралельність прямих $K - \ln N_w$ для різних металів і деяких їхніх сплавів вказує на близькі значення α_t для різних металів (рисунок 4.2).

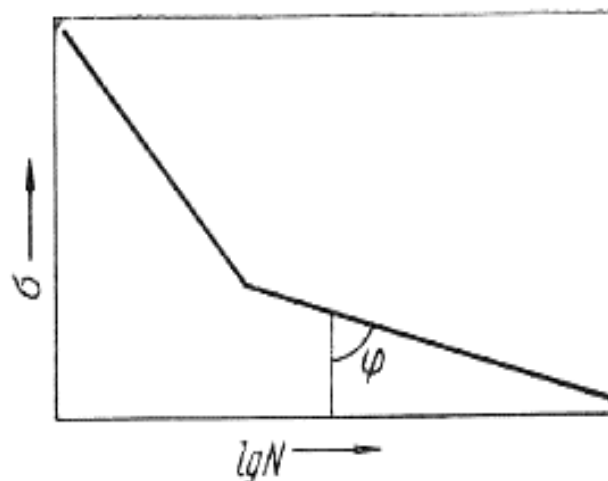


Рисунок 4.3 – Крива втоми технічного заліза $K = \tan \varphi$

Статистичну обробку експериментальних даних проводять по методу Митропольського - Шашина. Тангенс кута нахилу прямих $K - \ln N_w$ до осі

ординат дає значення α_σ і $2\alpha_\tau$, а відрізок на осі абсцис при $K = 0$ дає значення N_K (рисунок 4.3).

Таким чином, критичне число циклів N_K може бути розраховане зі співвідношення

$$N_k = \int_{T_u}^{T_s} C_p dT \frac{E}{\beta^2}, \quad (4.12)$$

Значення N_K може бути розраховане по спрощеній формулі

$$N_k = AC_p T_s \frac{1}{\beta_{cp}^2}, \quad (4.13)$$

де C_p - теплоємність металу при кімнатній температурі;

A - механічний еквівалент теплоти;

T_s - температура плавлення;

$\beta_{cp} = 8,5 \text{ кгс/мм}^2$.

4.3 Зведена таблиця критеріїв руйнування

Математичне формулювання	Фізичний зміст
$-\frac{\partial W}{\partial F} \geq \gamma$ де W – пружна енергія; F – площа тріщини; γ - питома поверхнева енергія руйнування	Енергетична стійкість тріщини при крихкому руйнуванні
$-\frac{\partial W}{\partial F} \geq \gamma$ де γ - питома поверхнева енергія руйнування з урахуванням пластичних деформацій	Енергетична стійкість тріщини при квазікрихкому руйнуванні
$J \geq J_{кр}$ де J - контурний інтеграл енергетичної стійкості, $J_{кр}$ - контурний інтеграл критичного рівня стійкості	Енергетична стійкість тріщини для пружно-пластичних тіл
$V(l) = \frac{\partial_k}{2}$ де $V(l)$ - зсув точок поверхні тріщини в усті тріщини;	Рівняння граничного стану рівноваги тріщини

∂_k - постійна	
$\Delta l = -\alpha \left(\frac{\sigma_{\max}}{\varphi} \right)^b$ де Δl - збільшення довжини тріщини за один цикл навантаження, α - емпірична постійна φ - кінетичний параметр суцільності	Рівняння росту тріщини при циклічному навантаженні
$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\alpha \left(\frac{\sigma_{\max}}{\varphi} \right)^b$ де φ - кінетичний параметр суцільності; t - час, $\sigma_{\max}$ - максимальне напруження у зразку; b - емпірична постійна	Феноменологічне рівняння розповсюдження тріщин
$\frac{\partial \omega}{\partial t} = c^* \sigma^n (1 - \omega)^m, \omega = 1 - \phi,$ де c^*, n, m - емпіричні постійні; φ - кінетичний параметр суцільності;	Те ж саме
$\int_0^{t^*} (t^* - \tau) \frac{dt}{l_0^{m+1} [\sigma_9(\tau)]} = \frac{1}{m+1},$	Теж з саме з врахуванням історії навантаження

де t^* - час до руйнування; $\sigma_0(\tau)$ - задана функція	
$\frac{\partial \phi}{\partial \lambda^*} = c \varepsilon_p; \sigma \leq \frac{\sigma_0}{\sqrt{1 + \phi}},$ де ε_p - пластична формація; λ^* - інваріант Одквіста; σ_0 - емпірична постійна	Те ж саме з критерієм початку руйнування
$N^{0,5} \Delta \varepsilon_p = \frac{l_p}{2},$ де l_p - дійсне подовження при руйнуванні; $\Delta \varepsilon_p$ - пластична деформація за цикл, N^* - число циклів до руйнування	Руйнування при досягненні сумарної пластичної деформації критичного значення
$\sigma^* = \bar{\sigma} - \sqrt{a \lg V + b}$	Статистичний опис найбільш імовірного значення міцності залежно від об'єму тіла
$P(\sigma) = 1 - \exp\left[- \int n(\sigma) dV\right]$ де $P(\sigma)$ - ймовірність крихкого руйнування зразка при напруженнях менших σ; $n(\sigma)$ - функція, введена Вейбуллом	Імовірність крихкого руйнування
$\sigma_H = \sigma_T [1 - a \ln \rho V]$	Статистичний опис швидкого

де σ_H - найбільш імовірна міцність; σ_T - теоретична міцність бездефектного зразка; ρ - щільність дефектів	руйнування як утворення й росту тріщин
$V\sigma_{-1}^{an} = c$ де σ_{-1} - границя витривалості при розтяганні - стиску; n - число зерен поряд, напруження в яких перевищує критичне значення	Статистичний опис руйнування від втомних тріщин, що виникають у результаті об'єднання руйнування перенапружених зерен
$\tau_H = \left[\int_0^\infty \left \frac{d \sum (\sigma_m)}{d \sigma_m} \right \frac{d \sigma_m}{N(\sigma_m)} \right]^{-1}$ де τ_H - очікуваний термін служби; σ_m - максимальне напруження циклу; $N(\sigma_m)$ - число циклів, що відповідає руйнуванню при $\sigma_m = \text{const}$; $\sum(\sigma_m)$ - середнє число перевищень напружень рівня σ_m в одиницю часу	Статистичний опис терміну служби при втомному руйнуванні

$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right)$ де τ - довговічність тіла; τ_0, U_0, γ - константи	Опис залежності довговічності тіл від напруження й температури
$c_{кр} \approx \frac{1}{(3R)^3}$ де $c_{кр}$ - гранична концентрація початкових тріщин, R - розмір початкових тріщин	Те ж з урахуванням граничної концентрації початкових тріщин
$\tau = f\left(\frac{\sigma}{T}\right) \exp\left(\frac{U_0}{kT}\right)$	Опис залежності довговічності тіла від напруження й температури
$\tau = \frac{b}{(\sigma - \sigma_0)^\alpha} \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right) \beta$	Теж для полімерів з урахуванням розриву зв'язків
$\int_0^t A_\phi dt \leq A_{кр}$ де A_ϕ - робота формозміни зразка	Руйнування при досягненні енергією формозміни критичного значення
$\int_0^t (A_\phi - U_d) dt \leq A_{кр}$ де U_d - розсіяна енергія	Те ж з врахуванням дисипації
$U \leq U_{кр}$ де U - щільність внутрішньої енергії	Руйнування при досягненні щільністю внутрішньої енергії критичного значення
$U_p \leq U_{pкр}$	Руйнування при досягненні щільністю енергії руйнування

де U_p – щільність енергії руйнування	критичного значення
$U_D \leq A_p$ де A_p - робота розриву зразка	Руйнування при досягненні розсіяної енергії критичного значення, рівного площі під кривою «дійсне напруження – дійсна деформація»
$A_0(N - N_{mp}) = L_{nl}$ де A_0 - робота руйнування за цикл, N_{mp} - число циклів до появи субмікроскопічних тріщин; L_{nl} - прихована теплота плавлення	Руйнування при досягненні щільністю роботи пластичної деформації прихованої теплоти плавлення
$\int_0^t S dt = S_{kp} - S_0$ де S - швидкість збільшення щільності ентропії; S_0 – початкова щільність ентропії	Руйнування при досягненні щільністю ентропії критичного значення
$\int_0^t p(t) dt = p_{kp} - p_0$ де p - швидкість збільшення пошкоджуваності матеріалу; p_0 - початкова пошкоджуваність	Руйнування при досягненні пошкодженням критичного значення з урахуванням потенційної енергії деформації
$\tau = \tau_0 \ln \frac{\Delta p_{\infty}}{\Delta p_{\infty} - \Delta p_{kp}} * \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT}\right)$ де $\Delta p_{kp} = p_{kp} - p_0$,	Те ж з урахуванням пошкодження при циклічній втомі

Δp_{∞} - кількість перенапружених зв'язків, здатних порватися під дією теплових флуктуацій	
$M_n = f(P_{i,j}, T) \prec c_n$ де M_n - міри пошкоджень, $P_{i,j}$ - тензор пошкоджень, c_n - емпірична постійна	Руйнування при досягненні абстрактною мірою пошкодження певного значення
$\int_0^t \frac{dt}{t(\sigma(t), T(t))} = 1$	Руйнування при досягненні критичного значення пошкодження, що додається лінійно
$\sum_{i=1}^q \frac{N_i}{N_i^*} = 1$ де N_i - число циклів навантаження; N_i^* - руйнуюче число циклів; I - номер режиму; q - число режимів	Те ж при різних режимах навантаження

Викладене вище дає змогу зробити певні припущення щодо математичної моделі, яка застосовується для опису загального процесу руйнування твердого тіла. У цьому контексті ключовим завданням є розробка критеріальних рівнянь, що дозволяють описати локальну довговічність. Найбільш перспективними виглядають ті критерії, які поєднують теоретичні засади термодинаміки необоротних процесів і механіки суцільного

середовища з використанням величин і понять, що можуть бути достовірно перевірені експериментально. З-поміж таких критеріїв найбільш повною мірою цим вимогам відповідають енергетичний критерій, заснований на енергії руйнування, що накопичується в матеріалі, а також критерій фізичного пошкодження. Ймовірно, об'єднання цих підходів дасть змогу створити узагальнений критерій руйнування, який поєднає їхні переваги та буде позбавлений їхніх недоліків.

5 ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ РУЙНУВАННЯ ДО ОЦІНКИ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

5.1 Критерії міцності й пластичності в механіці руйнування зварних з'єднань

Руйнування, що настає при однократному прикладенні постійно зростаючого навантаження, може бути або крихким (руйнування відколом), або в'язким, пов'язаним з розвитком пластичних деформацій.

Для в'язкого руйнування Г.В.Ужик приводить наступний критерій:

$$\sigma_i > \sigma_T; \quad \sigma_T = S = f(\sigma_1 / \sigma_i), \quad (5.1)$$

де σ_i , σ_1 — інтенсивність напружень і максимальне головне напруження;

S - опір руйнуванню деформованого металу;

σ_T — межа текучості при розтяганні.

При розтяганні гладкого зразка, коли $\sigma_1 / \sigma_i = 1$, руйнуванню передують, як правило, значні пластичні деформації, наявність концентратора напружень у тім або іншому ступені збільшує жорсткість напруженого стану в зоні вершини концентратора ($j = \sigma_1 / \sigma_i > 1$), що відповідно обмежує розвиток пластичних деформацій перед виникненням тріщини у вершини концентратора. У випадку об'ємного розтягання з рівними компонентами $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ інтенсивність напружень σ_i і деформацій ε_i виявляються рівними нулю, розвиток пластичних деформацій стає неможливим, і руйнування повинно відбуватися крихко відколом при

$$\sigma_1 = S_B, \quad (5.2)$$

де S_B — опір відриву недеформованого металу, рівне напруженню мікровідколу.

Умови настання ідеально крихкого руйнування при $\sigma_i = 0$ і $\epsilon_i = 0$, тобто при $j = \sigma_1 / \sigma_i = \infty$, у реальних умовах не реалізуються. Максимально можливе значення коефіцієнта $j = 2,6 \dots 3,0$ відповідає об'ємно-напруженому стану в умовах плоскої деформації, що може мати місце в локальній зоні у вершини тріщини. У цьому випадку крихкий відрив може наступати при вкрай обмеженій пластичній деформації за умови

$$\sigma_i \geq \sigma_T ; \sigma_1 \geq S_B, \quad (5.3)$$

Ліва сторона даної нерівності представлена у вигляді коефіцієнта жорсткості напруженого стану $j = \sigma_1 / \sigma_i$, що відображає ступінь локалізації напружень, тоді як права частина виражає співвідношення параметрів, які визначають механічні властивості металу. У цьому контексті величина S_B є певною сталою, яка характеризує опір крихкому руйнуванню. Вона не залежить від типу напруженого стану, температури, швидкості деформування чи тривалості навантаження, а визначається виключно структурним станом сталі. Навпаки, параметр σ_T суттєво змінюється залежно від вищезгаданих факторів.

Таким чином, цей вираз може бути використаний як основа для встановлення умов руйнування реального елемента конструкції. Однак для цього необхідно, по-перше, оцінити жорсткість локального напруженого стану в області поблизу концентратора у межах пружної поведінки

матеріалу, і по-друге, врахувати зміну напружено-деформованого стану при зростанні навантаження та розвитку пластичних деформацій у цій зоні.

Підходи до аналізу таких ситуацій залежать від типу концентратора – тріщиноподібного або нетріщиноподібного. Для перших, що характеризуються нульовим кутом розкриття та граничною гостротою ($\rho = 0$), застосовують методи механіки руйнування. У випадку нетріщиноподібних дефектів використовують методики, які базуються на оцінці концентрації напружень.

Критерії механіки руйнування можуть мати подвійну функцію: по-перше, описувати напружено-деформований стан у зоні біля вершини тріщини, а по-друге – відображати поведінкові особливості матеріалу в цій області, тобто його фізико-механічні властивості.

Різні за призначенням критерії мають і різні позначення. Якщо до позначення критерію додано індекс "с" (від англ. *critical*) або "р" (від *руйнуючий*), це вказує, що мова йде не про напружено-деформований стан, а про характеристику механічних властивостей матеріалу.

На практиці критерії механіки руйнування використовують не лише для оцінки властивостей матеріалів та їх напруженого стану у цільних деталях, а й у зварних з'єднаннях. Однак широке застосування цих критеріїв у зварних конструкціях гальмується низкою факторів:

1. Механіка руйнування – молода наукова дисципліна, яка ще перебуває в стадії розвитку, особливо в частині, що стосується практичного визначення механічних властивостей матеріалів і їх застосування у розрахунках на міцність. Сформовані уявлення щодо фізичної природи деяких критеріїв, їх взаємозв'язку, а також переваг чи недоліків у різних умовах ще уточнюються. Основна увага дослідників зосереджена на загальних принципах, без ускладнення проблемою зварних з'єднань і властивої їм неоднорідності.

2. Основи механіки руйнування будуються на припущенні однорідності матеріалу, зокрема в зоні біля тріщини, де розвивається

пластична деформація. У зварних з'єднаннях ж часто спостерігається значна неоднорідність механічних характеристик, оцінити вплив якої на достовірність визначення властивостей за критеріями механіки руйнування наразі складно. Ця невизначеність є ще однією перешкодою для широкого застосування таких критеріїв у зварних вузлах.

3. Зварні з'єднання мають підвищену концентрацію напружень, спричинену їхньою геометрією, особливо якщо мова йде не про стикові шви з видаленим укріпленням. Це ускладнює розрахунки, оскільки потребує точного визначення напруженого стану у складно сформованих зонах.

Механіка руйнування переважно орієнтована на тріщини. Але з точки зору норм і технологічної практики, тріщини в зварних швах є недопустимими і свідчать про дефекти зварювання чи порушення виробничого процесу. З цієї причини критерії руйнування найчастіше застосовуються не для розрахунку небезпеки таких дефектів, а для оцінки властивостей металу зони зварювання. Тим не менш, непровари, які нерідко трапляються (особливо в кутових швах), за своєю природою майже не відрізняються від тріщин, за винятком випадків, коли мають плавне заокруглення. Проте нечіткість у визначенні ступеня небезпеки подібних дефектів ускладнює ефективне застосування механіки руйнування до таких ситуацій.

Окрім згаданого, необхідно враховувати, що форма зварних швів у зонах переходу до основного металу, їхні малі радіуси заокруглення та наявність непроварів є типовими прикладами, де використання механіки руйнування є особливо доцільним і виправданим.

5.2 Критичні коефіцієнти інтенсивності напружень

Одним із ключових показників міцності в механіці руйнування є критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, що позначається як K_{Ic} або K_{Ic} . Його часто називають силовим критерієм, оскільки для його визначення необхідні дані про напруження або сили, прикладені до зразка під час випробувань. У багатьох випадках K_{Ic} і K_{Ic} асоціюються з лінійною механікою руйнування. Водночас відомі ситуації, коли значення K_{Ic} визначаються за умов, коли напруження перевищують межу текучості σ_T ; у таких випадках віднесення K_{Ic} до лінійної механіки руйнування є некоректним.

Під критеріями лінійної механіки руйнування слід розуміти ті, що можуть бути визначені за умови, коли середнє напруження в розрахунковій області не перевищує межу текучості, тобто $\sigma_{ср.р} < \sigma_T$. Точніше кажучи, ці критерії мають бути виведені на основі положень теорії пружності, навіть якщо в зоні біля вершини концентратора виникають локальні пластичні деформації. Надалі, використовуючи умову $\sigma_{ср.р} < \sigma_T$, будемо мати на увазі дотримання вимог для правильного визначення критеріїв у межах лінійної механіки руйнування.

Критерій K_{Ic} є одним із найбільш обґрунтованих з теоретичної точки зору та забезпечує високу точність у рамках механіки руйнування. Водночас згідно з ГОСТ 25.506-85, для його визначення використовуються зразки з наскрізними або крайовими тріщинами, що часто вимагає випробувань великих за розмірами зразків. Існують також методики, які передбачають використання зразків із поверхневими тріщинами, що дає можливість зменшити вимоги до товщини елементів при визначенні K_{Ic} .

Коли необхідно порівняти різні технології, режими зварювання або термічної обробки в однакових умовах, часто застосовують інші, менш

вимогливі до умов визначення, критерії механіки руйнування, які дозволяють здійснити якісну оцінку та зіставлення.

Значення K'_{Ic} у шві може бути різним залежно від напрямку руху тріщини — по товщині, у прямому або зворотному напрямку стосовно напрямку U_{CB} , а також від розташування тріщини по лінії сплавки або по колошовній зоні (рисунок 5.1).

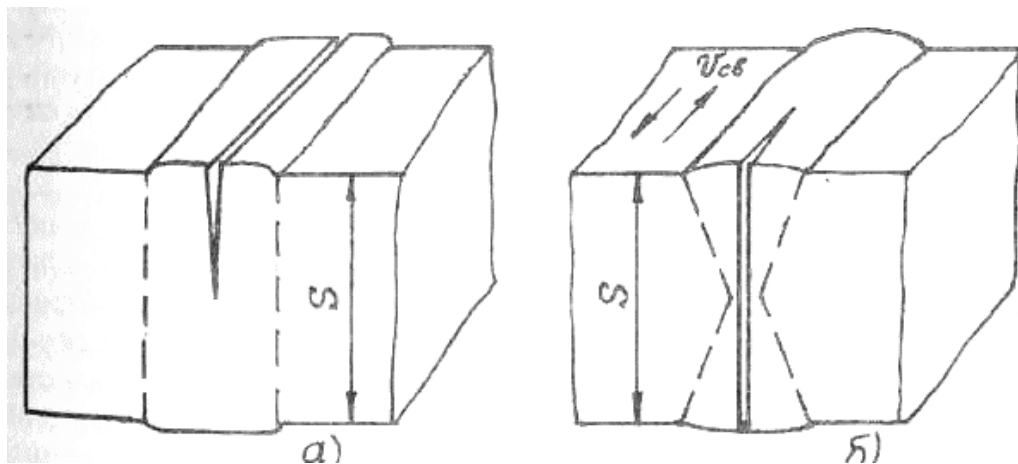


Рисунок 5.1 – Розташування тріщини в стиковому шві

Ці відмінності залежать також від того, чи були відповідні характеристики визначені на однорідному зразку, що моделює певну зону, чи на зразку зі зварного з'єднання, де поблизу тріщини розташовані ділянки металу з різними властивостями. Отримані для зварного з'єднання значення K'_{Ic} відповідають лише умовам проведеного експерименту. Вплив неоднорідності властивостей металу на значення K'_{Ic} досліджено ще недостатньо.

У багатьох випадках товщина металу у зварних конструкціях така, що точне визначення K_{Ic} є неможливим, тому замість нього визначають K_c . При зміні товщини металу значення K_c також змінюється, тобто K_c є умовною величиною, яка характеризує властивості матеріалу за певної товщини. Крім того, на значення K_c може впливати довжина тріщини. З урахуванням цього

запроваджено поняття межі тріщиностійкості, що враховує залежність від довжини тріщини.

Таким чином, K_s відображає не лише властивості металу, а й розміри зразка, параметри тріщини, особливості механічної неоднорідності тощо.

До основних зон концентрації напружень у зварних з'єднаннях зазвичай відносять такі дефекти, як несплавлення, плоскі шлакові включення та деякі інші.

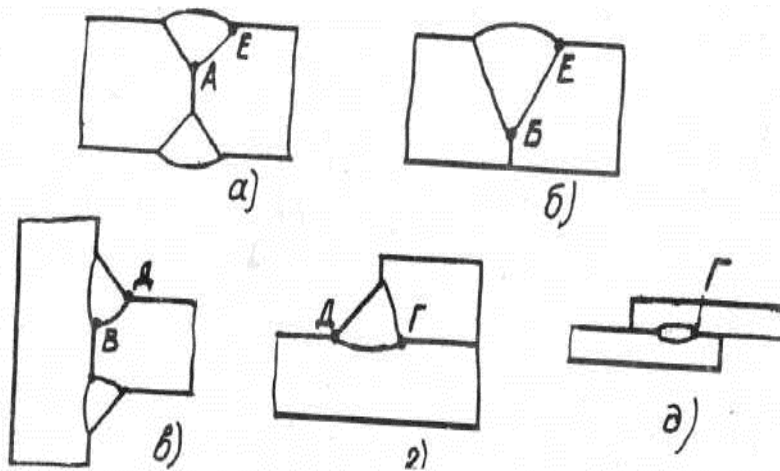


Рисунок 5.2 – Зони концентрації напружень у зварних з'єднаннях

Концентрація напружень значною мірою визначається радіусами заокруглень у зонах А, Б, В, Г, Д, Е (див. рисунок 5.2). Проведені мікроскопічні огляди та вимірювання радіусів свідчать про наступне. У всіх типах з'єднань місця непроварів часто завершуються дуже короткими тріщинами або надривами. Зрозуміло, що встановити або передбачити наявність таких дрібних тріщин у готових конструкціях практично неможливо. Тому доводиться вважати, що такі короткі дефекти можуть бути присутні. Зони переходу від наплавленого до основного металу (області Д і Е), як правило, мають кращу геометричну форму. Проте й тут можуть траплятися зони зі зварювальними підрізами, які мають малі радіуси. Проведений аналіз розсіювання значень радіусів переходу від шва до

основного металу показав, що у цьому процесі спостерігається певна закономірність.

Розглянемо окремі типи швів і з'єднань з точки зору застосування критеріїв лінійної механіки руйнування.

5.3 Стикові з'єднання

Оцінювати вплив непроварів на міцність конструктивних елементів доцільніше за допомогою випробувань зразків, у яких замість тріщини присутній саме непровар. У таких випадках результати можуть бути як гіршими, так і кращими, ніж для зразків із тріщинами у зварному металі. Це залежить від властивостей прилеглого основного металу, радіуса вершини непровару та умов формування цієї зони. Якщо потрібно визначити характеристики самого зварного металу у вигляді K_{Ic} , це краще робити на зразках із вирощеною втомною тріщиною в області шва.

Несплавлення часто мають форму тріщиноподібних дефектів. Щоб об'єктивно оцінити небезпеку таких несплавлень, слід використовувати зразки, що складаються як із металу шва, так і з основного металу, оскільки неоднорідність властивостей може вплинути на результат. Для несплавлень між шарами шва оцінку можна проводити за значенням K_{Ic} зварного металу.

5.4 З'єднання з кутовими й тавровими швами

У з'єднаннях із кутовими швами непровари в їх вершинах можуть спричиняти всі типи напруженого стану. При цьому в таврових з'єднаннях, де площа непровару перпендикулярна до напрямку основних зусиль, найбільш виразною є схема нормального відриву.

У з'єднаннях внахліст, а також у подібних конструкціях із проплавленими подовженими швами, швами у вигляді круглих заклепок чи

при контактному точковому або шовному зварюванні, повністю уникнути непроварів неможливо. Тому при виборі форми зразків важливо забезпечити відповідність навантажень у випробуванні тим, що діють у реальному з'єднанні, особливо у випадках, коли можливий нормальний відрив. Якщо він наявний у з'єднанні, то він повинен бути змодельований і у зразку. У разі його відсутності – варто виключити його зі схеми навантаження, оскільки він може спотворити результат при визначенні K_{Ic} .

Слід зазначити, що під час випробувань зварних з'єднань у натурному вигляді руйнування часто настає при середньому напруженні $\sigma_{ср} > \sigma_T$ (границі текучості), що унеможливорює пряме використання лінійної механіки руйнування. У таких випадках вдаються до альтернативних, зокрема деформаційних критеріїв, або застосовують спеціальні методи, які дозволяють перейти до розрахунків за критеріями лінійної механіки, навіть якщо $\sigma_{ср} > \sigma_T$.

Коефіцієнти інтенсивності напружень, як критерії оцінки властивостей металів і зварних з'єднань, застосовують не лише для статичних навантажень. Вони також використовуються при змінних навантаженнях, у корозійних середовищах або при температурах, відмінних від стандартних.

Існують ситуації, коли тріщина розвивається повільно, без різкого переходу до нестабільного руйнування. Наприклад, при високих температурах досягнення певного рівня K_{Ic} , що залежить від тривалості навантаження, може викликати повзучість, яка призводить до росту тріщини. Це також важливий параметр у механіці тріщин.

Подібні показники використовуються для оцінки впливу агресивних середовищ на розвиток тріщин. Критичні значення K_{Ic} або $K_{Ic,s}$, отримані в неагресивних умовах, можуть бути вищими за ті, що витримує матеріал у присутності агресивного середовища.

5.5 Деформаційні критерії

У багатьох випадках застосування критеріїв лінійної механіки руйнування для оцінки якості зварного металу, небезпечності дефектів і порівняння технологій є складним або неможливим, якщо руйнівне напруження $\sigma_{ср.р}$ наближається до або перевищує межу текучості σ_T . Тому значну увагу приділяють деформаційним критеріям, які дають змогу об'єктивно оцінити поведінку металу та з'єднань у процесі випробувань до руйнування, коли вже відбулися пластичні деформації.

Щоб краще зрозуміти фізичну суть деформаційних критеріїв, розглянемо напружено-деформований стан у кінці тріщини в розтягнутій пластині. У разі нормального відриву й відсутності пластичних деформацій розподіл напружень біля тріщини описується відповідними рівняннями:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_1}{\sqrt{\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right), \\ \sigma_y &= \frac{K_1}{\sqrt{\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right), \\ \tau_{xy} &= \frac{K_1}{\sqrt{\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}.\end{aligned}\tag{5.4}$$

Основні особливості напруженого стану поблизу тріщини

Головна характеристика напружень полягає в тому, що всі їхні компоненти зменшуються відповідно до певного закону в міру віддалення від вершини тріщини. Таку ж закономірність демонструють і відносні деформації. Переміщення точок, навпаки, зростають із віддаленням від вершини тріщини відповідно до визначеної залежності. Подібний розподіл

напружень і деформацій характерний для ідеалізованої ситуації, коли матеріал руйнується крихко, без пластичних змін. На практиці ж навіть за відносно невеликих напружень, які значно менші за межу плинності, в зоні вершини тріщини розвивається пластична деформація, тому в цій області реальний розподіл напружень відхиляється від теоретичного.

Проте, як не парадоксально, саме теоретичне — пружне — представлення напружень використовується для оцінки напруженого стану матеріалу в момент руйнування, навіть якщо в області вістря тріщини вже є пластичні деформації. Це пояснюється тим, що у великих зразках або деталях за межами пластично деформованої зони зберігається розподіл напружень, наближений до пружного. У розрахунках напруження і деформації в самій вершині тріщини прямо не враховуються. Натомість під час випробувань визначається середнє напруження, яке пов'язується з коефіцієнтом інтенсивності напружень K_1 . Це дозволяє непрямым шляхом оцінити напружено-деформований стан поблизу вершини тріщини на момент руйнування через характеристики за межами пластичної зони.

5.6 Енергетичні критерії

Енергетичні критерії в механіці руйнування мають важливе значення, оскільки саме енергетичні співвідношення визначають перехід від стабільного до нестабільного руйнування, а також сам процес руйнування. Йдеться про баланс енергії, яка підводиться до тріщини, та тієї, що витрачається на пластичну деформацію й прискорення уламків. Чим більше енергії поглинає метал під час деформації перед руйнуванням, тим вища його опірність руйнуванню.

Хоча фундаментальна роль енергетичних критеріїв у прикладних розрахунках ще повністю не усвідомлена, саме рівність приростів підведеної та витраченої енергії визначає момент, коли конструкція переходить від працездатного стану до раптового руйнування. Цікаво, що один і той самий

стан металу у зоні гострого надрізу, який за силовими або деформаційними критеріями свідчить про наближення руйнування, може відповідати різним енергетичним станам. У деяких випадках ці енергетичні умови достатні для розвитку нестабільного руйнування, в інших — ні.

При практичному застосуванні енергетичних підходів до оцінювання властивостей металів і зварних швів слід враховувати два аспекти. Перший — фізичний, який стосується механіки процесу пластичної деформації на різних етапах руйнування та можливості адекватного його моделювання в лабораторії. Другий — технічний і математичний, пов'язаний із методами реєстрації й обробки даних.

Поглинання енергії металом (переважно на пластичну деформацію) відбувається на трьох етапах:

1. до початку просування тріщини,
2. під час її стабільного зростання,
3. у фазі нестабільного (катастрофічного) розростання.

Першою фазою зазвичай нехтують, бо значна частина енергії витрачається на пружні деформації. У більшості випадків реєструється друга стадія — енерговитрати (наприклад, G_c , G_{lc} , J_c), пов'язані з просуванням тріщини та змінами в пластичній зоні. Причини стабільного зростання тріщини можуть бути дві:

- Підведеної енергії недостатньо для повного забезпечення росту тріщини, отже, потрібне або додаткове переміщення (без суттєвого зростання навантаження), або підвищення зусиль.
- Зміна форми та розміру пластичної зони зумовлює підвищені питомі витрати енергії.

Тому значення G_c і G_{lc} , обчислені на початковій фазі, не завжди збігаються з подальшими енерговитратами — вони можуть бути більшими чи меншими залежно від стадії руйнування.

Найбільш показовою для оцінки міцності металу вважається третя стадія — динамічного руйнування, адже саме вона характерна для аварій з

поділом конструкції на частини. Тож саме енергетичні характеристики, отримані за умов динамічного руйнування, мають найбільше практичне значення.

Варто враховувати, що навіть при правильному фізичному розумінні задачі, технічні та обчислювальні методи її реалізації не завжди дозволяють досягти точного результату. Є кілька підходів до визначення енергетичних характеристик:

1. Фіксація сили в момент руйнування (наприклад, метод із $G_c G_c$ через $K_c K_c$).
2. Визначення енерговитрат на випробувальній установці (наприклад, копрові випробування).
3. Побудова діаграм навантаження для зразків різного розміру до моменту їх руйнування (метод J-інтеграла).
4. Аналіз поля пластичних деформацій у зоні руйнування з використанням діаграм деформування та розрахунком витраченої енергії.
5. Визначення поглиненої енергії за тепловим ефектом.
6. Вимірювання енергії, витраченої на руйнування, через акустичну емісію (за наявності кореляції).

Кожен із методів має власну феноменологічну базу й відповідні математичні залежності для обробки даних. Особливості пластичної деформації під час руйнування необхідно враховувати при розробці відповідних енергетичних критеріїв оцінювання матеріалів.

У деталях із великим перерізом домінують умови плоскої деформації. Тому великогабаритні зразки краще відображають реальну поведінку металу як при крихкому, так і при в'язкому руйнуванні. Наприклад, у малов'язких металах товстого перерізу з характерною зональністю зрізу при зменшенні розміру зразка зазвичай спостерігається зростання питомої роботи руйнування. А у випадку в'язкого руйнування — спостерігається інша закономірність.

6 ПРОЦЕС РУЙНУВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ З ПОЗИЦІЇ МЕХАНІКИ ТРІЩИН

6.1 Процес втомного руйнування

У процесі експлуатації при несприятливому сполученні концентрації напружень, високого рівня залишкових напружень і наявності технологічних дефектів тріщини можуть виникати й при обмеженому числі навантажень. У процесі подальшої експлуатації зниження залишкової міцності в цьому випадку буде визначатися розвитком тріщини. У таких умовах методи опору матеріалів для розрахунку міцності й довговічності конструкцій виявляються недостатніми й доводиться переходити до використання критеріїв механіки руйнування й тріщин.

Дослідження в області механіки руйнування твердого тіла при змінних навантаженнях дозволили встановити важливі закономірності. Швидкість поширення втомної тріщини при розтяганні є функцією коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK і максимального значення $K_{\max}$, а у випадку пульсуючого циклу, коли $0 < R < 0,1$, маємо $\Delta K = K_{\max}$ тобто

$$\frac{dl}{dN} = F(K_{\max}), \quad (6.1)$$

У результаті аналізу численних експериментальних даних було з'ясовано, що для більшості матеріалів залежність у подвійних логарифмічних координатах має графічну форму S-подібної кривої. Цю криву називають діаграмою втомного руйнування (або діаграмою циклічної

тріщиностійкості) (рисунок 6.1). Вона складається з трьох характерних ділянок. Перша ділянка характеризується низькою швидкістю росту тріщини і відповідає таким значенням максимального коефіцієнта інтенсивності напружень у циклі (K_{max}), які є меншими за граничне значення K_{th} . У цьому діапазоні тріщина не поширюється.

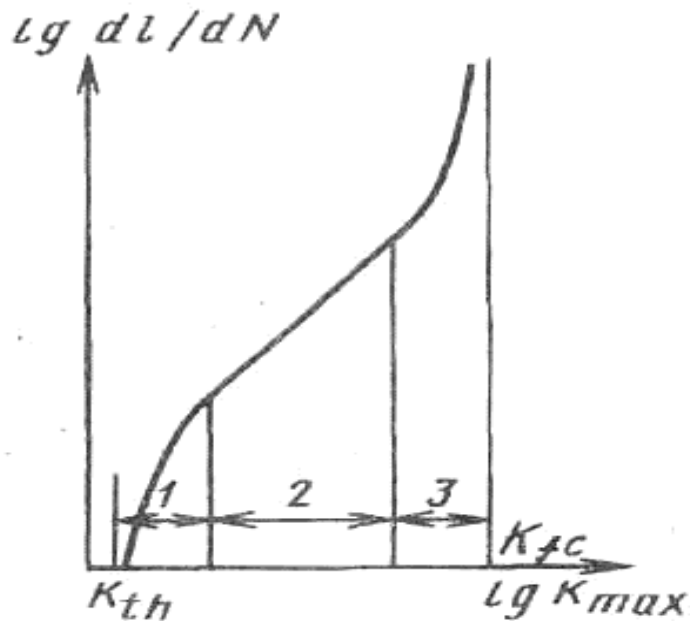


Рисунок 6.1 – Діаграма втомного руйнування

Середня ділянка 2 діаграми втомного руйнування зазвичай зображується прямою лінією. На підставі узагальнення різноманітних експериментальних даних показана доцільність зведення його до вираження (рівняння Паріса):

$$\frac{dl}{dN} = CK_1^n, \quad (6.2)$$

де C і n - постійні матеріалу;

K_1 — зміна коефіцієнта інтенсивності напружень за цикл навантаження. Відомості про значення C і n для різних матеріалів досить чималі.

Ділянка 3 високих швидкостей росту тріщин менш вивчена.

6.2 Зародження тріщини у зварних з'єднаннях і закономірності її росту

Описати процес втомного руйнування, зокрема зародження та розвиток тріщини, з єдиної теоретичної точки зору наразі не вдається. У зв'язку з цим, при розгляді етапу зародження тріщини зазвичай використовують класичні уявлення про втому матеріалу в умовах циклічного деформування. Натомість, стадію зростання тріщини аналізують на основі положень механіки руйнування.

Для порівняльної оцінки ризику виникнення втомної тріщини можна використовувати аналіз теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень. Зокрема, у стикових з'єднаннях порівняння значень $\alpha\sigma$ на поверхні в зоні переходу від зварного шва до основного металу, а також у місцях підрізів, пор чи включень, дозволяє визначити найвірогідніше місце виникнення втомної тріщини.

У разі наявності різко виражених тріщиноподібних дефектів (таких як непровари чи несплавлення) пластичні деформації, що виникають у вершині концентратора вже при початкових навантаженнях, змінюють його геометрію. Унаслідок цього фактичне значення коефіцієнта концентрації напружень $K\sigma$ відрізняється від його теоретичного значення $\alpha\sigma$.

Для оцінки кількості циклів до моменту зародження тріщини (N_{tr}) широко застосовується підхід, що базується на деформаційних критеріях. Прикладом такого підходу є рівняння, яке встановлює залежність між амплітудою локальної деформації за цикл ε_a і числом циклів до зародження тріщини N_{tr} .

$$\varepsilon_a = \frac{1}{4} \left(\ln \frac{100}{100 - \psi} \right) N_{tr}^{-0,5} + \frac{\sigma_s}{2E}, \quad (6.3)$$

де σ_b , E , ψ - відповідно межа міцності, модуль пружності й відносне звуження матеріалу в зоні розташування концентратора.

Підхід, що базується на використанні деформаційних критеріїв, зазнав суттєвого розвитку. Водночас, через значну різноманітність форм, розмірів і розміщення концентраторів, а також через неоднорідність механічних властивостей у зонах зварних швів, застосування деформаційних критеріїв для визначення N_{tr} часто виявляється складним завданням.

Експериментальні методи позбавлені таких обмежень, однак виникають труднощі методичного характеру. Вони пов'язані як із виготовленням зварних зразків із необхідними для дослідження дефектами, так і з проведенням випробувань та обробкою отриманих результатів. У науковій літературі містяться дані щодо експериментального визначення зниження втомної міцності зварних з'єднань із поодинокими дефектами різних типів і розмірів.

Коефіцієнти K_f визначалися як відношення амплітуди деформації бездефектного зразка до амплітуди деформації зразка з дефектом при однаковому ресурсі до появи тріщини. При цьому враховувалося, що в зразках були внутрішні дефекти, і об'єктом спостереження було не саме зародження тріщини, а момент її виходу на поверхню. Оскільки в подібних умовах тривалість служби включає також стадію росту тріщини, яка може становити суттєву частину загального ресурсу, отримані значення коефіцієнта K_f слід розглядати як умовні. Ще більше складнощів виникає при дослідженні групових дефектів, що зумовлює необхідність застосування іншого методичного підходу для такого роду експериментів.

7 ПРИКЛАДНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ РУЙНУВАННЯ

7.1 Визначення довговічності зварних конструкцій з позиції механіки руйнування

Під час дослідження взаємозв'язку між мікро- та макромеханізмами виникнення і розвитку тріщин зазвичай виділяють три основні етапи втомного процесу: утворення мікропошкоджень, їхнє зростання та остаточне руйнування матеріалу. Проте повністю пов'язати мікро- та макромеханізми втомного руйнування та об'єднати їх у єдину формалізовану теорію наразі неможливо.

Для практичних розрахунків особливо важливо визначити момент переходу від стадії утворення тріщини до її подальшого росту. Теорія тріщин вказує, що руйнування конструкції настає тоді, коли тріщини здатні до поширення — саме це є необхідною умовою для макроскопічного руйнування. Т. Екоборі зазначає, що для металів доцільно вважати моментом переходу досягнення тріщиною певної умовної довжини, наприклад 1 мм, або таких розмірів, за яких вона стає помітною неозброєним оком. Хоча такий критерій не має чіткої фізичної інтерпретації, у технічних розрахунках його використовують для оцінки місцевої довговічності конструкцій. Початком нестійкого стану системи з певним рівнем пошкодженості матеріалу вважають появу першої втомної тріщини у найбільш напружених зонах. Цю тріщину не слід плутати з випадковими дефектами чи тріщинами, що не розвиваються далі.

Втомна довговічність зварних конструкцій визначається тривалістю служби зварних з'єднань. Саме зони зварювання найчастіше є джерелом втомних пошкоджень, що пов'язано з наявністю локальних напружень різного типу і зварювальних дефектів. Основною причиною виникнення втомних пошкоджень є динамічні навантаження, які виникають у несучих

елементах під час експлуатації кранів. Серед усіх видів навантажень найбільший вплив мають циклічні навантаження, що з'являються під час руху кранів по рейках, зокрема від дії їхньої ходової частини. Динамічний характер навантажень залежить від низки випадкових факторів — таких як нерівності рейкового шляху, знос коліс, зміни у взаємодії елементів системи «рейка–колесо–конструкція» тощо, — що робить навантаження нестабільними, а зміну динамічних напружень — нестационарною. Протягом експлуатаційного періоду загальна кількість циклів динамічного навантаження може перевищувати 10^6 . Оцінювати втомну довговічність таких зварних конструкцій доцільно в межах концепції багатоциклової втоми із застосуванням лінійної гіпотези акумуляції пошкоджень у режимі несталоного навантаження.

У цій моделі розглядається пружна поведінка матеріалу за припущенням його суцільності, відсутності дефектів і внутрішньої структури. Механічні властивості приймаються відповідно до середніх макроскопічних характеристик реального матеріалу. Вплив фактичних дефектів та пластичних деформацій враховується у вигляді допустимих значень напружень.

Згідно з гіпотезою сумування втомних пошкоджень, повне руйнування настає тоді, коли сума всіх накопичених пошкоджень досягає одиниці. Це можна записати у вигляді відповідного рівняння.

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (7.1)$$

де n_i — кількість повторень амплітуди напружень величини σ_i за термін служби деталі;

N_i — число циклів, при якому відбувається повне пошкодження при амплітуді напружень σ_i .

Велика кількість експериментальних перевірок даної гіпотези показало відхилення загальної суми відносних пошкоджень, у зв'язку із чим формула приймає вигляд

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = a, \quad (7.2)$$

де a - коефіцієнт, що має значення в межах $0,5 < a < 2$.

Облік кривої втоми матеріалу в рамках багатоциклової моделі здійснюється шляхом її ступеневої апроксимації у вигляді

$$\sigma_i^m N_i = const, \quad (7.3)$$

де m - показник ступеня витривалості;

N_i – число циклів до руйнування при напруженні σ_i ;

Оцінка втомної довговічності несучих конструкцій здійснюється з урахуванням запасу опору втоми

$$\frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,\text{Э}}} \geq [n_y], \quad (7.4)$$

де $\sigma_{a,N}$ - величина межі витривалості натурної деталі, для симетричного циклу при базовому числі циклів випробувань N_0 і еквівалентне по руйнівному впливу реальному режиму експлуатаційних випадкових напружень за проектний термін служби конструкції;

$[n_y]$ – допустиме значення коефіцієнта запасу опору втоми.

Вибір значення $[n_y]$ здійснюється в межах $1,3 < [n_y] < 2,2$

залежно від типу деталі. Базове число циклів можна прийняти 10^7 циклів.

Визначення межі витривалості натурної деталі $\sigma_{a,N}$ здійснюється з урахуванням імовірнісного розсіювання характеристик опору втомі й розподілу миттєвих значень випадкових величин, близького до нормального за допомогою виразу

$$\sigma_{a,N} = \bar{\sigma}_{a,N} (1 - Z_p v_{\sigma_{a,N}}), \quad (7.5)$$

де $\bar{\sigma}_{a,N}$ - середнє значення межі витривалості натурної деталі;

Z_p - квантиль розподілу відповідної ймовірності P , прийнятий за умови,

що $\sigma_{a,N}$ - випадкова величина, що має нормальний закон розподілу;

$v_{\sigma_{a,N}}$ - коефіцієнт варіації межі витривалості деталі.

Значення Z_p приймається для основних несучих деталей металоконструкції крана для ймовірності $P = 0,95$ рівним 1,645, значення v_{σ} приймається залежно від марки сталі й умов зварювальних робіт у межах $0,05 < v_{\sigma} < 0,12$.

Середнє значення межі витривалості натурної деталі $\bar{\sigma}_{a,N}$ визначається виразом

$$\sigma_{a,N} = \frac{\bar{\sigma}_{-1}}{(K_{\sigma})_K}, \quad (7.6)$$

де $\bar{\sigma}_{-1}$ - середнє значення межі витривалості гладкого стандартного зразка з матеріалу деталі при симетричному циклі згину на базі N_{σ} ;

$(K_{\sigma})_K$ – середнє значення загального коефіцієнта зниження межі витривалості натурної деталі стосовно межі витривалості гладкого стандартного зразка.

Значення $\bar{\sigma}_{-1}$ приймають залежно від марки стали.

Величина коефіцієнта $(K_{\sigma})_K$ визначається по наступній формулі

$$(K_{\sigma})_K = K_{\sigma} \frac{K_H \cdot K_Y}{K_M K_{пов}}, \quad (7.7)$$

де K_{σ} - ефективний коефіцієнт концентрації напружень у зоні зварного шва;

K_H - коефіцієнт неоднорідності матеріалу;

K_Y - коефіцієнт впливу зміцнюючої поверхневої обробки деталі;

K_M - коефіцієнт впливу розмірів деталі;

$K_{пов}$ - коефіцієнт впливу якості поверхні деталі.

Значення $K_H, K_M, K_{пов}$ - приймаються залежно від типу матеріалу деталі, її характерних розмірів і якості поверхонь. Вплив зміцнюючої поверхні обробки враховується за допомогою уточнених величин коефіцієнта K_Y , наведених у літературі.

Значення N_i з урахуванням межі витривалості натурної деталі й відповідного йому базового числа циклів випробувань.

Значення приведеної амплітуди динамічних напружень:

$$\sigma_{a,\epsilon} = \sqrt[m]{\frac{N_c}{N_0} \sum_{i=1}^k \sigma_i^m n_i}, \quad (7.8)$$

де N_c - сумарне число циклів динамічних напружень за розрахунковий термін служби.

Приймаємо $a = 1$, тоді

$$\sigma_{a,\epsilon} = \sqrt[m]{\frac{N_c}{N_0} \sum_{i=1}^k \sigma_{ai}^m P_i}, \quad (7.9)$$

де σ_{ai} - рівень амплітуди напружень;

P_i - імовірність появи амплітуд з рівнем σ_{ai} .

Визначення значень величини σ_{ai} й відповідних їм значень P_i досягається шляхом статистичної обробки осцилограми процесу зміни динамічних еквівалентних напружень у часі. Статистична обробка виконується методом повних циклів, при цьому розглядаються амплітуди напружень від $\sigma_{\min}$ до $\sigma_{\max}$. З урахуванням зниження межі витривалості деталі в процесі тривалого циклічного навантаження мінімальний рівень напружень, що мають руйнівний вплив, визначається по залежності

$$\sigma_{\min} = k_n \sigma_{aN}, \quad (7.10)$$

де k_n - коефіцієнт, що визначає нижню межу руйнівних напружень.

У результаті статистичної обробки визначається амплітудно-частотна характеристика процесу, на підставі якої розраховується величина наведеної амплітуди динамічних напружень.

Наближене значення величини приведеної амплітуди динамічних напружень $\sigma_{a,\epsilon}$ також можна визначити на підставі статичних розрахунків несучих конструкцій на підставі наступної залежності

$$\sigma_{a,\epsilon} = \sqrt[m]{\frac{N_c}{N_0} \sum_{i=1}^{K_v} \sigma_{aen}^m P_{Vi}}, \quad (7.11)$$

де K_v , P_{Vi} - кількість швидкісних інтервалів і їхня ймовірність відповідно в певному інтервалі швидкості;

σ_{aen} - приведена амплітуда еквівалентних напружень при русі із установленою швидкістю.

Крім цього, є наближена методика, у якій величина σ_{aen} визначається по формулі, що використовує в якості вихідних даних результати статичного розрахунку напружено-деформованого стану конструкцій

$$\sigma_{aen} = 1,1 \times \sigma_{cv} \times (k_{dvi} + \Psi_{\sigma D}), \quad (7.12)$$

де σ_{cv} - статичні нормальні напруження від ваги металоконструкції;

k_{dvi} - коефіцієнт вертикальної динаміки для відповідної швидкості рухів крана;

$\Psi_{\sigma D}$ - коефіцієнт чутливості матеріалу до асиметрії циклу.

Припускаючи, що граничний стан настає при зниженні коефіцієнта запасу опору втими нижче мінімально допустимого, маємо умову досягнення граничного стану

$$\frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,\epsilon}} = [n_Y], \quad (7.13)$$

В якості критерія відмови служить поява в досліджуваному конструктивному елементі втомної тріщини, що розвивається, довжиною 10-15 мм. Одержуємо залежність для визначення ресурсу зварювального шва в циклах навантаження у вигляді

$$N_c = \frac{\left(\frac{\sigma_{a,N}}{[n_Y]} \right)^m \times N_0}{\sum_{i=1}^k \sigma_{ai}^m P_i}, \quad (7.14)$$

Сумарний час дії динамічних напружень за термін служби конструкції визначається по формулі

$$T_p = B \times T_k, \quad (7.15)$$

де T_k – розрахунковий термін служби зварного шва;

B – коефіцієнт перекладу терміну служби в роках під час безперервного руху в секундах, знайдений по формулі

$$B = 365 \frac{10^3 L_c}{k_{np} V}, \quad (7.16)$$

де L_c - проектний пробіг крана за добу;

V - середня швидкість руху;

k_{np} - коефіцієнт, що враховує час простою.

Сумарний час дії динамічних напружень до настання граничного стану у зварному шві

$$T_p = \frac{N_c}{f_{\text{з}}}, \quad (7.17)$$

де $f_{\text{з}}$ - центральна (ефективна) частота процесу зміни динамічного напруження.

Визначення величини $f_{\text{з}}$, може відбуватися по залежності

$$f_{\text{з}} = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{f_{cm}}}, \quad (7.18)$$

де a - коефіцієнт, що враховує розташування шва;

f_{cm} - статичний прогин металоконструкції.

Після перетворень і підстановок одержимо залежність для служби конструкції в роках

$$T_k = \frac{N_c}{B * f_{\text{з}}}. \quad (7.19)$$

У такий спосіб стає можливим визначення характеристик тривалої працездатності за допомогою методів теорій тріщин і руйнування.

7.2 Вплив залишкових зварних напружень на довговічність швів

Сучасні методики прогнозування втомної довговічності несучих конструкцій зазвичай враховують вплив концентрації напружень, однак у більшості випадків не беруть до уваги залишкові напруження, що виникають унаслідок зварювання. Водночас ці залишкові зварювальні напруження істотно впливають на довговічність зварних несучих конструкцій при багатоциклового навантаженні.

Методика Ю.Ф. Кудрявцева дозволяє враховувати вплив залишкових зварювальних напружень на втомну довговічність зварних швів на етапі зародження втомних тріщин. Визначення межі витривалості зварного шва під дією значних залишкових розтягальних напружень базується на залежності, встановленій для шва без залишкових напружень.

При побудові втомної кривої в логарифмічній шкалі була отримана відповідна залежність.

$$\lg \frac{N_{ост}}{N_0} = \left(\sigma_{\max} - \frac{\sigma_B - \frac{\sigma_T}{K_\sigma}}{\frac{\sigma_B}{\sigma_R} - 1} \right) \frac{\lg \left[\left(\frac{K_\sigma}{\sigma_T} \right)^m \frac{C}{N_0} \right]}{\lg \left[\frac{\sigma_T \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_R} - 1 \right)}{K_\sigma \left(\sigma_B - \frac{\sigma_T}{K_\sigma} \right)} \right]}, \quad (7.20)$$

де $N_{ост}$ – ресурс зварного шва з врахуванням нормальних залишкових зварних напружень розтягу;

N_0 - базове число циклів випробувань;

$\sigma_{\max}$ - рівень максимальних напружень циклу зовнішнього навантаження;

σ_B – межа міцності матеріалу;

σ_T - межа текучості матеріалу;

K_σ - ефективний коефіцієнт концентрації напружень;

C - коефіцієнт для широкого кола завдань;

m - показник ступеня кривої втоми;

σ_R – межа витривалості зварного з'єднання без залишкових напружень

$$\sigma_R = \frac{2}{\frac{1 - R_\sigma}{\sigma_{a,N}} + \frac{1 + R_\sigma}{\sigma_B}}, \quad (7.21)$$

тут $\sigma_{a,N}$ - величина межі витривалості зварного шва (по амплітуді), обчислена для симетричного циклу при базовому числі циклів випробувань;

R_σ - коефіцієнт асиметрії циклу зовнішнього навантаження.

Залишкові зварювальні напруження враховуються шляхом визначення коефіцієнта Q , що показує в скільки разів зменшується циклічна довговічність зварного з'єднання під дією залишкових зварних напружень.

$$Q = \frac{N_c}{N_{ост}}, \quad (7.22)$$

де N_c – ресурс зварного шва в циклах без врахування залишкових зварювальних напружень.

Визначення ресурсу шва з врахуванням нормальних залишкових напружень розтягу, $N_{ост}$ здійснюється відношенням ресурсу зварного шва N_c до коефіцієнта Q . У такий спосіб розрахунок терміну служби зварного шва із

залишковими зварювальними напруженнями виконується по формулі визначення ресурсу з підстановкою $N_{ост}$ замість N_c .

7.3 Оцінка довговічності зварних з'єднань із тріщиноподібними дефектами

Даний напрям досліджень є ключовим для оцінки працездатності зварних конструкцій, що містять дефекти у вигляді тріщин. Період експлуатації виробу від моменту появи першої макроскопічної тріщини до остаточного руйнування називають залишковою живучістю. Як зазначалося раніше, перехід від мікротріщини до макротріщини визначається досягненням певної критичної довжини, яка, згідно з різними джерелами, становить від 0,2 до 2 мм.

Критерієм працездатності зварного з'єднання, що містить макротріщину, є її мінімальна довжина L , за якої відбувається подальше зростання тріщини під дією циклічних навантажень з амплітудою σ_a . Умова, за якої тріщина не поширюється, має наступний вигляд:

$$(\sigma_a)^m \cdot L \leq C, \quad (7.23)$$

де C , m – постійні матеріалу, що характеризують його тріщиностійкість.

Якщо в конструкції наявна тріщина, яка може розширюватися під дією циклічних навантажень, виникає потреба у визначенні її залишкового ресурсу або живучості.

Один із сучасних підходів до такої оцінки базується на синергетичній теорії пошкодження металів при пружно-пластичному деформуванні. Цей підхід враховує реальну поведінку полікристалічного матеріалу з наявними дефектами в умовах циклічного динамічного навантаження, включаючи стадію пружно-пластичної деформації, що передує руйнуванню.

Основною ідеєю концепції є те, що межа енергії, яку може поглинути об'єм металу під час деформування, визначається міцністю міжатомних зв'язків. Також передбачається наявність зв'язку між накопиченням пошкоджень у матеріалі та кількістю енергії, яка при цьому розсіюється.

У рамках теорії руйнування процес навантаження конструкції розглядається як передача їй енергії, що витрачається на деформацію. Переходом від дисипації енергії через пластичну деформацію до дисипації, зумовленої мікроруйнуваннями, слугує щільність енергії деформації. Її граничне значення W_c вважається матеріальною константою й використовується як енергетичний критерій локальної міцності. Саме це критичне значення контролює момент появи стабільних мікротріщин, здатних самостійно розвиватися. Тому умову стабільності пластичної деформації можна подати у вигляді:

$$W \leq W_c, \quad (7.24)$$

де W - поточне значення щільності енергії деформації.

Поточне значення щільності енергії деформації є додатком двох складових, перша з яких відповідає дисипації енергії шляхом дисторсії (зміни форми) W_d , інша – дилатації: зміни елементарного об'єму (блоку) W_v (рисунок 7.1).

$$W = W_d + W_v, \quad (7.25)$$

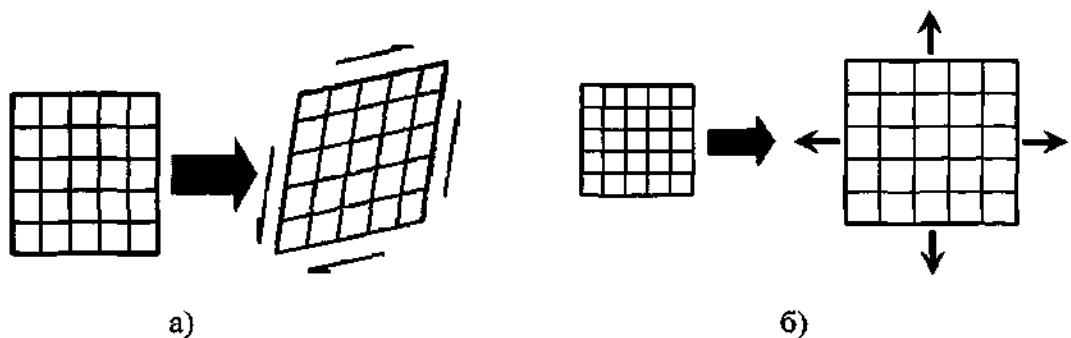


Рисунок 7.1 – Схема дисипації енергії блоками в зоні фронту тріщини:
а – шляхом дисторсії; б – шляхом дилатації.

Зміна функції щільності енергії деформації визначається площею під кривої діаграми розтягу в координатах дійсне напруження – дійсна деформація

$$\frac{dW}{dV} = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} + f(\Delta T, \Delta C), \quad (7.26)$$

де σ_{ij} – складова напруги;

ε_{ij} – складова деформації;

$f(\Delta T, \Delta C)$ – функція, що характеризує зміни температури й складу середовища.

Оскільки зварні несучі конструкції кранів у процесі експлуатації практично не піддаються різкій зміні температури й концентрації середовища, залежність може бути записана у вигляді

$$\frac{dW}{dV} = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}, \quad (7.27)$$

Обидві складові приросту щільності енергії деформації можуть бути подані через нормальні (σ) та зсувні (τ) напруження в пружно-пластичній області. Діаграму розтягу в координатах дійсне напруження – дійсна деформація, з урахуванням рівності площ під кривими (що відповідає рівності критичних значень щільності енергії деформації), можна замінити еквівалентною ідеалізованою пружно-пластичною діаграмою (див. рисунок

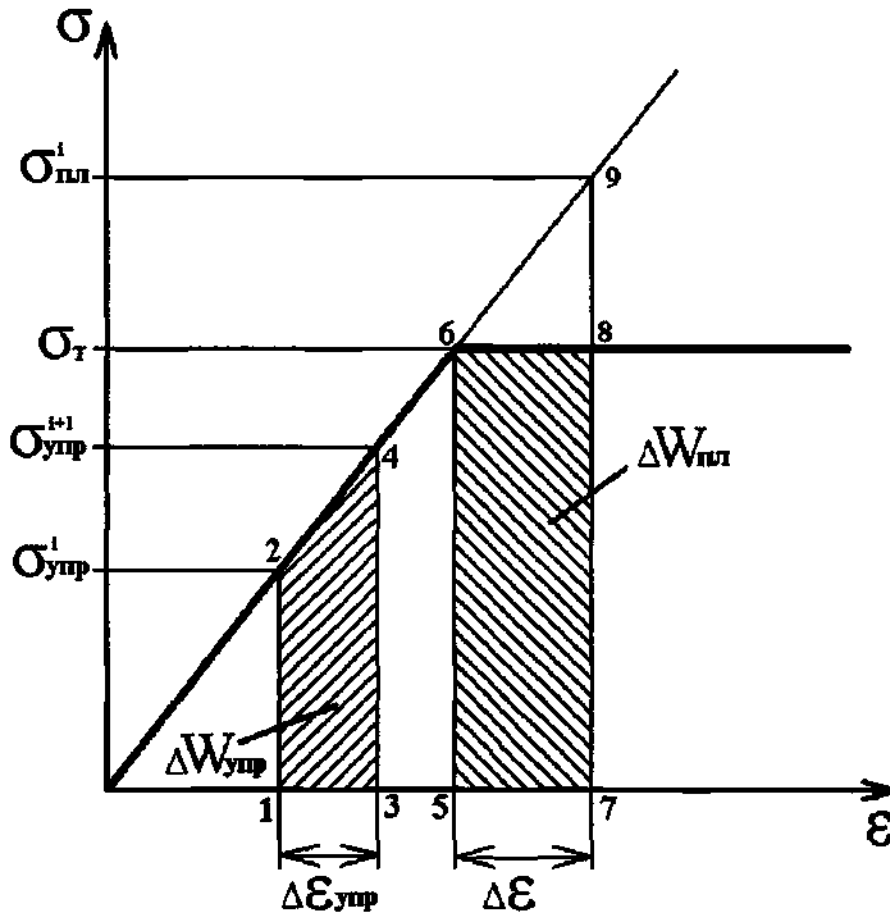


Рисунок 7.2 – Графік збільшення щільності енергії деформації.

Збільшення щільності енергії деформації в пружній області для $(i + 1)$ навантаження буде дорівнює площі трапеції 1-2-4-3 і може бути визначене як

$$\Delta W_{упр} = 0,5(\sigma_{упр}^i + \sigma_{упр}^{i+1}) \cdot (\Delta \epsilon_{упр}), \quad (7.28)$$

Збільшення щільності енергії деформації в пластичній області для i -го навантаження буде дорівнює площі прямокутника 5-6-8-7 і визначається по залежності

$$\Delta W_{nl} = \sigma_T \cdot \Delta \varepsilon_{nl}, \quad (7.29)$$

де σ_T – межа текучості матеріалу.

У випадку циклічного навантаження конструкції, що приводить до пластичних деформацій у локальній зоні, передуючій руйнуванню, акумулюється щільність енергії деформації пластичної області до критичного значення W_c , при перевищенні якого відбувається руйнування елемента

$$W_c = W_{unp} + \sum_{j=1}^{\Delta N} (\Delta W_{nl})_j, \quad (7.30)$$

де ΔN – кількість циклів до руйнування.

Для оцінювання напруженого стану в області зварного шва з тріщиноподібним дефектом із загальної кінцево-елементної моделі несучої конструкції, шляхом послідовного виділення зон, виділяється ділянка шва. Для неї створюється пружно-дисипативна кінцево-елементна модель зі збільшеною щільністю сітки. З урахуванням потреби в аналізі об'ємного напруженого стану поблизу тріщиноподібного дефекту, модель будується із використанням просторових кінцевих елементів із чотирма, шістьма та вісьмома вузлами. Рівень деталізації обирається з урахуванням необхідності точно передати геометрію зварного шва. По межах виділеної моделі задаються динамічні навантаження у вигляді осцилограм, отриманих із відповідних вузлів повної моделі конструкції. Експлуатаційне навантаження

на конструкцію розглядається як послідовність блоків динамічних зусиль, прикладених протягом певного періоду.

Для підвищення точності розрахунків динамічного напруженого стану в околі вершини тріщиноподібного дефекту з моделі зварного шва виділяється область, що охоплює сам дефект. Для цієї області створюється більш деталізована пружно-дисипативна кінцева модель на основі об'ємних елементів. Навантаження на цю модель задається динамічними зусиллями у вигляді осцилограм, отриманих з меж відповідної ділянки моделі зварного шва.

Щоб врахувати різку концентрацію напруг і деформацій у зоні вершини тріщини, ця ділянка моделюється за допомогою п'ятигранних квадратичних об'ємних елементів зі зміщеними до вершини проміжними вузлами на довжину сторони елемента. Розміри елементів встановлюються відповідно до розміру зерна полікристалічної структури сталі в зварному з'єднанні, що дорівнює 0,1 мм.

У результаті розрахунків кінцево-елементної моделі ділянки шва визначаються блоки динамічних нормальних і дотичних напружень у зоні вершини тріщиноподібного дефекту. На основі цих даних обчислюються поточні значення щільності енергії деформації як для пружної, так і для пластичної зон у кожному циклі навантаження.

Кількість навантажувальних циклів до досягнення в матеріалі зварного з'єднання в області вершини дефекту критичного рівня щільності енергії деформації (W_c) визначається, виходячи з накопичених значень щільності енергії в пружній та пластичній зонах на кожному циклі відповідного блоку навантаження.

$$\Delta N = \frac{W_c - W_{уп}}{\sum_{j=1}^n \Delta W_{пл}} \cdot m, \quad (7.31)$$

де n – кількість циклів навантажень з напруженнями, що приводять до пластичного деформування матеріалу в блоці;

m – кількість циклів навантажень у блоці.

У кінцево-елементній моделі на вершині дефекту, де спостерігається найвища щільність енергії деформації, визначається кількість циклів навантаження, необхідна для досягнення критичного значення цієї щільності. Після досягнення граничного стану у вершині тріщиноподібного дефекту аналізується подальше його розповсюдження. При моделюванні росту тріщини враховується її дискретний характер, що є характерним для умов циклічного навантаження. Крок росту приймається рівним розміру кінцевого елемента у зоні вершини тріщини.

Процес росту тріщини реалізується шляхом послідовної заміни кінцевого елемента у вершині дефекту, де щільність енергії деформації перевищує критичне значення $W_{cW_cW_c}$, на два кінцевих елементи з роз'єднаними вузлами, які утворюють напрям росту тріщини. Нова вершина тріщини формується в елементі, що безпосередньо прилягає до вилученого. Ця процедура повторюється доти, поки тріщина не досягне граничного стану, після чого починається лавиноподібне її розростання.

Розглядається об'ємне розповсюдження тріщини, ініційованої тріщиноподібним дефектом, як у глибину зварного шва, так і вздовж нього. Загальна кількість циклів навантаження до моменту, коли тріщина, що зародилася на основі дефекту, стає наскрізною (визначає живучість шва), визначається за відповідною залежністю.

$$N_{жс} = \sum_{i=1}^k \Delta N_i, \quad (7.32)$$

де k - кількість ітерацій у процесі моделювання росту тріщини до критичного стану.

Швидкість росту тріщини для кожного етапу визначається виразом

$$v = \frac{dL}{dN} = \frac{L_c}{\Delta N}, \quad (7.33)$$

де L_c – довжина кінцевого елемента у вершини тріщиноподібного дефекту (крок дискретизації росту тріщини).

8 МОДЕЛЮВАННЯ УМОВ НАСТАННЯ ГРАНИЧНОГО СТАНУ РУЙНУВАННЯ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ЗВАРНОГО ВИРОБУ

Існування потенційної загрози катастрофічних руйнувань із серйозними матеріальними та екологічними наслідками зумовлює необхідність удосконалення методів розрахунку таким чином, щоб забезпечити незруйновність ключових елементів зварних конструкцій уже на етапі проектування.

На відміну від контрольних розрахунків, що спрямовані на перевірку працездатності вузлів у вже виготовлених або експлуатованих зварних конструкціях, проектні розрахунки мають забезпечувати можливість порівняння різних конструктивно-технологічних варіантів з метою вибору найнадійнішого рішення.

Оперативне виконання таких розрахунків можливе лише за умови широкого застосування обчислювальної техніки та моделювання процесу деформування з аналізом змін у напружено-деформованому стані аж до досягнення критичних стадій руйнування (див. рисунок 8.1).

Розв'язання цього складного завдання значно спрощується завдяки, по-перше, наявності відповідної методики та програмного забезпечення для моделювання напружено-деформованого стану в процесі навантаження, а по-друге — надійній критеріальній базі для визначення моменту виникнення макротріщини.

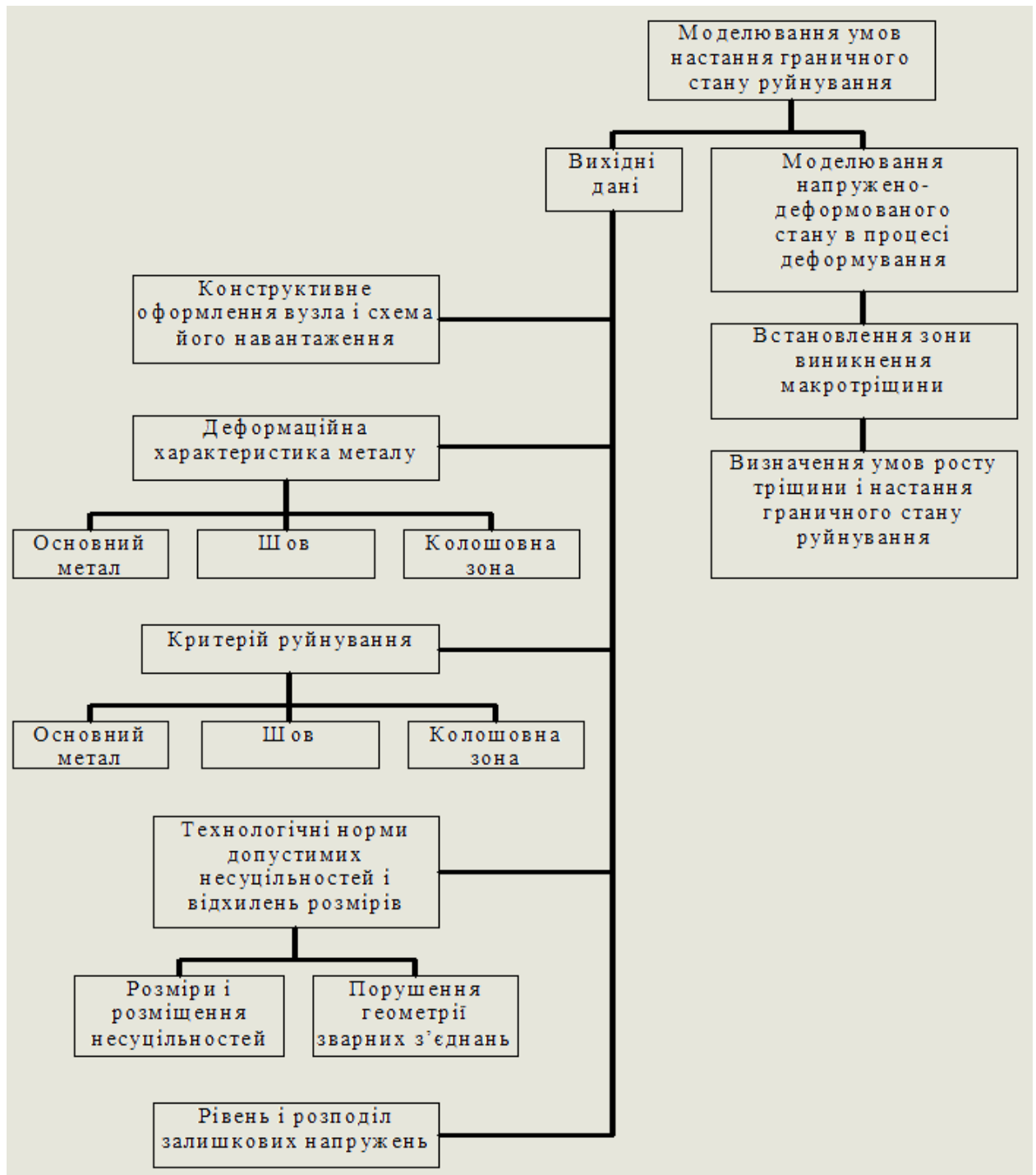


Рисунок 8.1 – Схема постановки розрахунку незруйновості зварного з'єднання при проектуванні (за матеріалами Віокурова В.А.).

Моделювання напружено-деформованого стану металу в області вершини гострого концентратора або тріщини дозволяє достовірно відтворити процес деформації реального конструктивного елемента з однорідного металу. Критерієм появи макротріщини може слугувати

досягнення граничного значення пластичної деформації ϵ_i , яка залежить від ступеня жорсткості напруженого стану. Подальший аналіз змін у напружено-деформованому стані після зародження макротріщини дозволяє оцінити напрямок її поширення та швидкість росту в залежності від зростання навантаження, тобто характер руйнування.

На відміну від однорідного металу, при моделюванні руйнування зварного вузла або з'єднання необхідно враховувати специфічні особливості, характерні для виробів, виготовлених методом зварювання. Серед них — неоднорідність механічних властивостей, залишкові напруження та можливі дефекти як технологічного, так і експлуатаційного походження.

Для проведення такого розрахунку необхідно відповідально підійти до підготовки вихідних даних (поз. 2). Інформація про конструктивне виконання вузла та схему його навантаження повинна дати змогу створити коректну розрахункову модель і визначити розміщення та конструктивне оформлення зварних з'єднань (поз. 3). Для моделювання процесу спільної деформації різних зон зварного з'єднання потрібні дані про деформаційні характеристики металу в цих зонах при робочих температурах, що визначаються шляхом випробувань на розтягування гладких циліндричних зразків, вирізаних із зварних з'єднань пластин, зварених відповідно до проектної технології (поз. 4).

Щоб визначити момент утворення макротріщини в тій чи іншій зоні зварного з'єднання, необхідно мати експериментально встановлені залежності граничної пластичності від жорсткості напруженого стану для кожної характерної зони з'єднання. Такі залежності отримують шляхом розтягування циліндричних зразків з кільцевими надрізами різної гостроти при експлуатаційних температурах (поз. 5).

Підготовка вихідних даних для врахування можливих дефектів під час проєктування є значно складнішою, ніж при виконанні контрольного розрахунку конкретного виробу. У проєктних умовах геометричні характеристики несучильностей і їх розташування, а також відхилення форми

зварних з'єднань задаються з урахуванням допустимих меж, встановлених нормативною документацією для відповідного типу виробу (поз. 6).

Розрахунок рівня та розподілу залишкових напружень доцільно виконувати з урахуванням параметрів запроєктованої технології зварювання, геометрії вузла, механічних властивостей металу й можливих подальших обробок, якщо вони передбачені проєктом (поз. 7).

Усі наведені вище вихідні дані дають змогу виконати моделювання напружено-деформованого стану конструктивного вузла під час його навантаження (поз. 8).

У результаті моделювання мають бути визначені зони концентрації напружень і деформацій, у яких першочергово досягається рівень $\varepsilon_i = \varphi(j)$, що вказує на утворення нової макротріщини (поз. 9). Якщо вважати зону, де досягнуто це значення $\varepsilon_i = \varphi(j)$, областю росту тріщини, то це дозволяє оцінити інтенсивність її поширення зі збільшенням навантаження, а також визначити умови досягнення граничного стану для різних варіантів вихідних даних, що відповідають конкретному конструктивно-технологічному рішенню. Якщо ж вузол піддається змінним навантаженням, то граничний стан, зафіксований при моделюванні під монотонним навантаженням, може розглядатися як момент переходу до стрибкоподібного росту втомної тріщини при черговому навантаженні (поз. 10)

ВИСНОВКИ

Подані в цій роботі аргументи ще раз засвідчують важливість теорії руйнування у контексті вирішення задач визначення довговічності та залишкового ресурсу конструкцій. Наявні на сьогодні методи обстеження не дозволяють у повному обсязі здійснити об'єктивну оцінку стану металоконструкцій і підтвердити можливість подальшої експлуатації техніки з уже наявними дефектами. Інтенсивний розвиток досліджень у цій галузі науки зумовлює потребу в новітніх технологіях, які б забезпечили більш точне моделювання умов експлуатації та механізмів подальшого руйнування систем. На поточному етапі розвитку науково-технічного прогресу створення абсолютно бездефектних конструкцій як з точки зору проектування, так і виробництва є неможливим. Водночас контроль за процесом роботи обладнання є необхідною умовою для попередження небажаних наслідків. Дане дослідження не ставить за мету створення чіткої методики оцінювання та прогнозування технічного стану конструкцій. Основна мета роботи полягає в узагальненні наукових результатів, пов'язаних із теорією руйнування, у різних напрямках — таких як термодинаміка, матеріалознавство та механіка.

Серед основних результатів роботи варто відзначити:

1. аналіз механізму втомного руйнування металевих матеріалів;
2. узагальнення та систематизація понять і критеріїв теорії руйнування стосовно конкретної сфери застосування;
3. впровадження засад механіки руйнування у дослідження втомних процесів у кранових металоконструкціях;
4. проведення оцінки технічного стану металоконструкцій кранів та прогноз їхнього залишкового ресурсу;
5. використання теорії руйнування на етапі проектування зварних конструкцій.

Представлені в роботі напрацювання є актуальними та мають значний науковий потенціал, однак їх практична реалізація на реальних об'єктах поки що залишається завданням майбутнього.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Бойко В.С.** *Механіка руйнування конструкцій.* — Київ: КНУБА, 2008. — 256 с.
2. **Бережной А.И.** *Механика разрушения и прочность сварных конструкций.* — Київ: Наукова думка, 1991. — 272 с.
3. **Зінов'єв В.В.** *Діагностика зварних з'єднань.* — Київ: КНУТД, 2005. — 200 с.
4. **Овчаров В.С.** *Тріщиностійкість конструкційних матеріалів.* — Харків: НТУ «ХП», 2002. — 312 с.
5. **Левченко В.Д.** *Зварювання у машинобудуванні.* — Київ: Либідь, 2012. — 384 с.
6. **Скляренко В.К., Нікітченко В.М.** *Надійність зварних конструкцій.* — Дніпро: ДНУ, 2004. — 174 с.
7. **Геллер Ю.М.** *Усталостное разрушение материалов.* — Москва: Машиностроение, 1972. — 280 с.
8. **Каширцев В.А.** *Надежность сварных конструкций.* — Новосибірськ: НГТУ, 2006. — 220 с.
9. **Anderson T.L.** *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications.* — 4th ed. — CRC Press, 2017. — 640 p.
10. **Suresh S.** *Fatigue of Materials.* — 2nd ed. — Cambridge University Press, 1998. — 700 p.
11. **Dowling N.E.** *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue.* — Pearson, 2013. — 912 p.
12. **Murakami Y.** *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions.* — Elsevier, 2002. — 400 p.
13. **Lemaitre J., Desmorat R.** *Engineering Damage Mechanics: Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures.* — Springer, 2005. — 576 p.

14. **Broek D.** *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. — Springer, 1986. — 524 p.
15. **Maddox S.J.** *Fatigue Strength of Welded Structures*. — Woodhead Publishing, 1991. — 208 p.