

**Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

**по дисципліні «СПЕЦІАЛЬНІ ГЛАВИ
МІЦНОСТІ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ»
для студентів спеціальності 7.092301
«Устаткування і технологія зварювання»**

Краматорськ 2020

ЗМІСТ

	Вступ.....	7
1	ОСНОВНІ ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ.....	10
2	ОСНОВИ ТЕОРІЇ ПРУЖНОСТІ Й ПЛАСТИЧНОСТІ	
	2.1 Властивості металів при одновісьовому розтяганні.....	23
	2.2 Напруження в точці	34
	2.3 Теорії напружено – деформованого стану тіла.....	37
	2.4 Плоский напружений стан, плоска деформація.....	42
	2.5 Приклади і їх рішення.....	44
3	ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗВАРНИХ З’ЄДНАНЬ	
	3.1 Механізм впливу концентраторів на розподіл напружень і деформацій.....	50
	3.2 Концентрація напружень і пластичні деформації металу при руйнуванні.....	53
	3.3 Критерії оцінки напружено – деформованого стану при концентрації напружень.....	55
4	ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПІРНОСТІ МЕТАЛУ РУЙНУВАННЮ В ПРИСУТНОСТІ КОНЦЕНТРАТОРІВ	
	4.1 Оцінка властивостей металу й елементів конструкції на стадії утворення тріщин.....	61
	4.2 Критична рівновага тріщини.....	69
	4.3 Енергетична умова А.Гріффітса.....	71
	4.4 Поширення тріщини в загальному випадку.....	77
	4.5 Поширення тріщини при наявності в матеріалі крихкої зони.....	78
	4.6 Еквівалентна довжина тріщини.....	79
	4.7 Енергетичні методи визначення опірності металу утворенню і поширенню тріщини.....	81
	4.8 Силкові критерії руйнування.....	84
	4.9 Оцінка розмірів пластичної зони уздовж тріщини.....	89
	4.10 Методи визначення опірності металу поширенню тріщин.....	95
	4.11 Приклади і їх рішення	100
5	ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ НА РОБОТОЗДАТНІСТЬ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ	
	5.1 Проблема обліку впливу дефектів на роботоздатність зварних з’єднань.....	107
	5.2 Оцінка впливу тріщиноподібних дефектів за силовим і	

деформаційним критеріями.....	108
5.3 Чутливість зварних з'єднань до концентрації напружень	113
5.4 Коефіцієнти запасу за різними критеріями.....	114
5.5 Порядок розрахунку допустимості наявного дефекту.....	117
5.6 Облік впливу механічної неоднорідності на роботоздатність зварних конструкцій	118
5.7 Оцінка роботоздатності стикових з'єднань при наявності дефектів типу несущільностей.....	118
5.8 Приклад і рішення	127
6 ВПЛИВ МЕХАНІЧНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ НА РОБОТОЗДАТНІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ	
6.1 М'які і тверді прошарки в зварних з'єднаннях.....	129
6.2 Напружений стан і міцність м'якого прошарку при розтягуванні, вигині.....	130
6.3 Контактне зміцнення.....	135
6.4 Робота подовжнього і кільцевого шва в циліндричній посудині тиску.....	138
6.5 Вплив обробки металу і анізотропії на пластичну деформацію і міцність при розтягуванні.....	139
7 ВПЛИВ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР НА МІЦНІСТЬ І ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ	
7.1 Зміна властивостей металів при зниженні температури.....	143
7.2 Методи оцінки властивостей металів при зміні температури.....	146
7.3 Основні фактори, що знижують холодостійкість зварних з'єднань	149
7.4 Оцінка холодостійкості зварних з'єднань.....	155
7.5 Приклади крихких руйнувань.....	156
7.6 Методи підвищення холодостійкості зварних з'єднань.....	157
8 РОБОТА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ	
8.1 Властивості основного металу.....	158
8.2 Міцність і пластичність металу при високих температурах.....	162
8.3 Вплив концентраторів напружень на міцність і пластичність металу при високих температурах.....	166
8.4 Релаксація.....	166
8.5 Властивості зварних з'єднань при високих температурах експлуатації і вплив на них механічної неоднорідності.....	167

8.6	Локальні руйнування і методи оцінки схильності до них зварних з'єднань	172
8.7	Розрахунок зварних з'єднань на міцність.....	173
8.8	Приклад і рішення.....	174
9	ВПЛИВ КОРОЗІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА НА МІЦНІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ	
9.1	Корозійні середовища та види корозійних ушкоджень металу й зварних з'єднань..	174
9.2	Методи оцінки роботоздатності зварних з'єднань у корозійних середовищах.....	182
9.3	Основні методи підвищення стійкості зварних з'єднань проти корозійного руйнування.....	188
9.4	Міцність зварних конструкцій в агресивних середовищах.....	188
10	РОЗРАХУНКОВА І КОНСТРУКЦІЙНА МІЦНІСТЬ	
10.1	Несуча здатність зварних конструкцій.....	189
10.2	Властивості зварних з'єднань.....	190
10.3	Розсіювання механічних властивостей металів, геометричних розмірів елементів, навантажень.....	191
10.4	Конструкційна і розрахункова міцність, причини їх розбіжності.....	197
10.5	Шляхи зближення розрахункової і конструкційної міцності.....	199
	Перелік посилань.....	201

ВСТУП

Інтенсивне використання металів у XIX і на початку XX століття призвело до того, що кількість аварій і нещасних випадків досягла великих розмірів. Більшість із них відбувалося через тріщини в осях, колесах, трубах та інших деталях металоконструкцій. З появою зварних конструкцій кількість нещасних випадків збільшилася. Використання зварювання при виготовленні металоконструкцій добавило фактори, зв'язані як з конструктивним оформленням зварних конструкцій, так і з технологією їхнього виготовлення і які викликали їхнє руйнування. З 2500 кораблів типу "Ліберті", які були побудовані в США під час другої світової війни, 145 розламалися навіпіл і майже 700 потерпіли серйозних ушкоджень [8]. Така ж доля спіткала безліч мостів та інших споруджень.

Дослідження причин аварій на 151 промисловому об'єкті показало, що з 1831 металевої ферми було зруйновано 1318 [8]. Основною причиною аварій ферм були дефекти при їхньому виготовленні й монтажі. Корозійні руйнування є одними із основних ушкоджень металоконструкцій.

Великий вплив на стан металоконструкцій проявляють також фактори техногенного характеру. Більше 70% промислових об'єктів перебувають під загрозою природних явищ: зрушень, повеней, землетрусів та ін. Близько 50% металофонду в різних галузях промисловості й сільському господарстві експлуатується в умовах середньо- і дуже агресивних середовищ. В Україні втрати від корозії становлять 10...15 % усього виробленого чорного металу. Кожні три роки необхідно перефарбовувати 75% металоконструкцій і 10...20% замінити в результаті корозійного зношування [8].

Руйнування інших виробів часто відбувалося при безперервній дії невеликих напружень (деякі кораблі руйнувалися, коли вони перебували у гавані). Проведені дослідження дозволили встановити, що причиною руйнування з'явилися раковини й концентрації напружень. Руйнування відбувалося так, начебто матеріал конструкції був крихким і воно супроводжувалося дуже незначними пластичними деформаціями.

Після Другої світової війни використання високоміцних матеріалів збільшилося. Вони стали застосовуватися там, де потрібно було зменшити вагу конструкції й коефіцієнти запасу. Отже, конструкції, які виконані з високоміцних матеріалів, мають лише невеликий запас міцності. Це означає, що робочі напруження можуть бути достатніми для утворення тріщин, особливо, якщо в матеріалі із самого початку є великі концентрації напружень і раковини, тобто високоміцні матеріали мають низьку тріщиностійкість (в'язкість руйнування); а конструкції, які виконані із цих матеріалів, можуть зруйнуватися при напруженнях менших, ніж максимальне робоче напру-

ження, на яке вони були розраховані.

На стадії проектування тип з'єднання визначає появу конструктивних концентраторів напруження, а призначення методу й прийомів зварювання – появу характерних технологічних дефектів. Ці концентратори напружень в умовах експлуатації зварної конструкції стають потенційними джерелами руйнувань. Джерелом руйнувань, насамперед, є технологічні несучільності, які виникають у процесі виробництва зварних конструкцій. Їхній негативний вплив проявляється навіть у випадку статичного прикладання навантаження при несприятливому сполученні із власними напруженнями при дії низьких температур або агресивних середовищ. Найбільш сильно впливають несучільності при роботі конструкції при циклічному навантаженні, при якому навіть невеликий дефект або концентратор може стати джерелом зародження тріщини. Рішення про допуск виробу до експлуатації без виправлення дефекту може бути прийнято, якщо виконаний розрахунок, який показує, що в процесі експлуатації його зародження тріщини від дефекту й наступний її зріст ще не призведуть до настання граничного стану руйнування у межах заданого часу експлуатації.

Вивчення питань міцності, пов'язаних з настанням руйнування, стало актуальним також тому, що знайшли застосування такі матеріали й умови експлуатації конструкцій, з яких настання руйнування стало одним з можливих граничних станів, які необхідно враховувати при розрахунку їхньої міцності. До теперішнього часу майже повсюди використовувалися розрахунки на міцність за допустимими напруженнями або нормативними опірностями, які призначалися залежно від межі текучості матеріалу. Такий підхід недостатній при оцінці працездатності зварної конструкції, що експлуатується при низьких і високих температурах, у корозійних середовищах, при наявності концентраторів напружень, неоднорідності зварних з'єднань, а також застосуванні при її виготовленні високоміцних матеріалів.

Україна має значний обсяг металоконструкцій, збереження яких у стані, придатному для експлуатації, є найважливішою народногосподарською проблемою.

Механіка руйнування, або теорія тріщин, як складова частина науки про міцність займається визначенням законів розділення твердих тіл на частини під дією зовнішніх силових факторів та інших причин.

Руйнування може бути частковим і повним. Часткове руйнування тіла характеризується пошкодженням матеріалу внаслідок виникнення в ньому окремих тріщин або розподілення за об'ємом дефектів, що знижують його міцностні властивості. При повному руйнуванні відбувається розподілення тіла на частини. Руйнування є найбільш характерним показником порушення міцності твердого тіла.

Освоєння нової галузі науки "Механіка руйнування" щодо виготов-

лення зварних конструкцій викликало появу дисципліни "Спеціальні розділи міцності зварних конструкцій".

Мета механіки руйнування – з'ясування умов руйнування на частини твердих тіл, різної форми зварних з'єднань і елементів конструкцій, які працюють під дією заданих навантажень в особливих умовах їхньої експлуатації.

Для забезпечення надійності конструкції необхідно передбачати, як будуть зростати тріщини і як швидко буде зменшуватися залишкова міцність. Здійснення таких передбачень і розвиток методів їх одержання є предметом знань механіки руйнування в особливих умовах експлуатації, яка повинна відповісти на наступні питання:

- 1 Яка залежність міцності виробу від розміру тріщини?
- 2 Який розмір тріщини може бути припустимий при передбачених експлуатаційних навантаженнях?
- 3 Як довго буде продовжуватися зростання тріщини від початкового розміру до критичного в різних умовах експлуатації ?
- 4 Який розмір раковин допустимий у початковий момент експлуатації конструкції ?
- 5 Як часто необхідно перевіряти наявність тріщин у конструкціях?

У сучасній науково-технічній літературі наведені результати експериментальних випробувань і теоретичних досліджень щодо впливу концентраторів (тріщин і інших дефектів) на процес руйнування металів з позиції лінійної механіки руйнування.

На Україні в поточний час не існує підручників або навчальних посібників, що розглядають питання впливу концентраторів, знакозмінних навантажень, виду зварного з'єднання на процес руйнування зварних конструкцій і які б відповідали програмі й навчальному плану дисциплін "Спеціальні розділи міцності зварних конструкцій" і "Проектування зварних конструкцій".

У цьому посібнику наведені узагальнюючі відомості й викладені питання стосовно до оцінки працездатності зварних з'єднань і конструкцій в особливих умовах експлуатації і які стосуються напружено-деформованого стану зварних з'єднань; критеріїв оцінки й методів опірності металу на стадії зародження й поширення тріщини; впливу дефектів, механічної неоднорідності, корозії, виду зварного шва на міцність зварних з'єднань у різних умовах їхньої експлуатації (низьких і високих температурах, знакозмінних навантаженнях, корозійних середовищах).

1 ОСНОВНІ ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ

Умови експлуатації

Умови експлуатації – це навантаження, температура, середовище, радіація й час, на протязі якого діють ці фактори.

Умови експлуатації впливають головним чином на вибір матеріалу, тип зварних з'єднань, способи зварювання і обробку зварних конструкцій після зварювання.

Існують умови експлуатації, коли зварна конструкція має велику накопичену енергію, тому що під навантаженням знаходяться значні ділянки металу з високим рівнем діючих напружень (газопроводи великого діаметра, крупні посудини зі стиснутим газом, посудини із високоміцних сталей), у яких накопичена енергія пружних деформацій дуже значна і руйнування яких супроводжується значним вивільненням енергії.

Область низьких температур диктує свої вимоги у відношенні до вибору металу із-за можливості негативного прояву низькотемпературної крихкості. В області низьких температур (до $-60 \dots -80^{\circ}\text{C}$) забезпечують достатньо хорошу працездатність зварні конструкції на основі застосування сталей з невисоким ступенем легування і термічно оброблених. При криогенних температурах необхідно використовувати спеціальні сталі і кольорові сплави та відповідні способи зварювання.

В області високих температур експлуатації вибір відповідного жароміцного матеріалу є вирішальним для забезпечення необхідної працездатності зварної конструкції. При експлуатації при більш високих температурах застосовують сплави, які потребують використання спеціальних способів зварювання і зварювальних матеріалів, а також наступної термічної обробки.

Дії фактора середовища дуже різноманітні. Він може мати негативний наслідок навіть при відсутності навантажень, утворюючи, наприклад, корозію металу. При сполученні з навантаженням можливо корозійне розтріскування і утомленість. Значний вплив на вибір металу виявляє характер агресивного середовища.

Умови навантаження

Умови навантаження – це швидкість прикладання й тривалість дії навантаження у часі.

Граничні стани

Граничний стан – це стан конструкції або деталей, коли їхня експлуа -

тація вважається неможливою, небезпечною або небажаною. Експлуатація неможлива, коли відбулося руйнування конструкції, надмірна корозія, втрата загальної або місцевої стійкості. Експлуатація небезпечна – це часткове руйнування, місцева текучість матеріалу, значна корозія, поява течії в посудинах. Експлуатація небажана – це значні деформації, поява коливань.

За граничні стани в техніці береться настанання текучості металу, його руйнування, втрата стійкості елемента, переміщення або деформація неприпустимої величини, прогин балки заданої величини, задане подовження металу при повзучості й т.ін.

Граничний напружений стан

Граничний напружений стан – це досягнення в якій-небудь точці деталі або в її перетині напруженого стану, що відповідає настанню нового процесу (текучість металу, утворення шийки, руйнування). Досягнення граничного напруженого стану в якій-небудь точці деталі або в перетині ще не означає настання граничного стану в деталі в цілому (наприклад, багатопрогонова балка продовжує сприймати зростаючі навантаження після настання повної текучості в якому-небудь окремому перетині, поки не перейдуть у пластичний стан інші перетини балки). Іноді розглядається можливість настання в одній деталі декількох граничних станів. Наприклад, у зварному розкосі ферми, що працює при перемінних розтягуючих або стискаючих навантаженнях, можливими граничними станами будуть: настання текучості, утрата стійкості (при стиску), поява тріщини утомленості або руйнування в момент прикладання максимального розтягуючого навантаження. Найбільш не безпечнішими граничними станами вважаються різні види руйнувань.

У розрахунках на міцність можуть розглядатися, як можливі, кілька граничних станів, які називаються розрахунковими граничними станами. На прикладі статичного розтягування гладкого зразка (рис.1.1) можна простежити настання декількох граничних станів: текучість – 1, досягнення тимчасового опору (утворення шийки) – 2, настання руйнування (поява тріщини) – 3, поширення тріщини – 4.

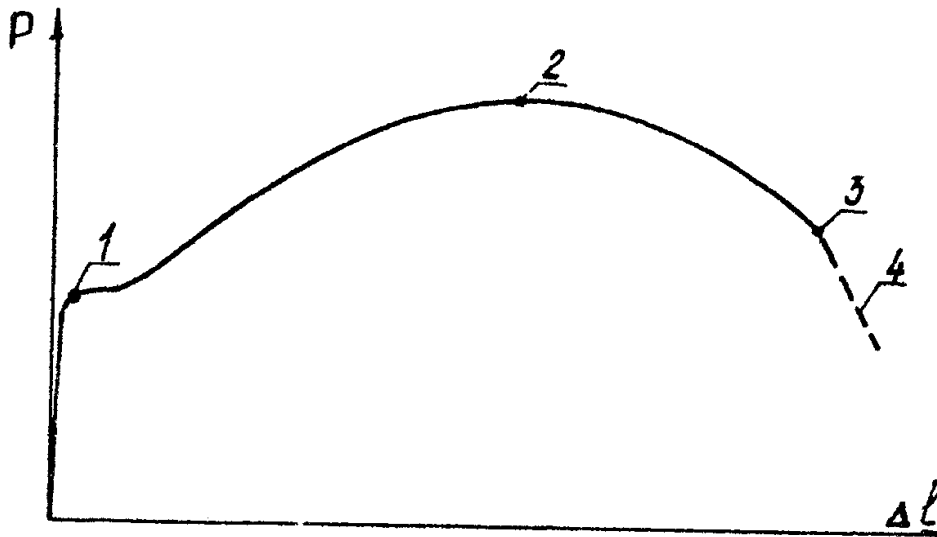


Рисунок 1.1 – Насавання різних граничних станів при розтягуванні гладкого зразка

Навантаження

Одним з основних факторів, що впливають на умови експлуатації зварних конструкцій, є навантаження, які розрізняються за швидкістю їхнього прикладання, за тривалістю й умовах, при яких вони діють.

Навантаження граничні – це навантаження, які відповідають граничному стану.

За швидкістю прикладання навантаження поділяються на:

- статичні – відносно повільне їхнє прикладання й можуть бути постійними й повторно-статичними (багаторазові статичні навантаження, що змінюються із частотою не більше одного навантаження за секунду);
- вібраційні – відносно високі швидкості прикладання навантаження з частими їх змінами (більше 1 Гц);
- ударні (однократні або повторно-ударні) – дуже високі швидкості прикладання навантажень.

Характеристика навантаження залежить від умов, у яких воно діє: низькі або високі температури, тип середовища, наявність радіації й інші.

Навантаження можуть бути утворені як зовнішніми взаємодіями, наприклад, зусиллями, так і власними деформаціями, наприклад, при нерівномірних нагріваннях і структурних перетвореннях.

Навантаження в сполученні з формою зварних з'єднань і елементів конструкцій утворюють складне розподілення напружень, від яких у більшості випадків залежать міцність і працездатність зварних з'єднань. Найбі-

льший вплив виявляє циклічний характер навантаження, особливо при великій кількості циклів. Ударний характер навантажень відноситься також до кількості найбільш тяжких режимів роботи зварних конструкцій.

Багато сталей чутливі до збільшення швидкості прикладання навантажень в області низьких або високих температур, особливо при наявності концентраторів напружень. Це передбачає необхідність вибору металу з урахуванням термічної обробки до і після зварювання, достатньо плавних форм зварних з'єднань, підвищених норм контролю зварних з'єднань і самого металу.

Міцність

Під міцністю (в інженерному смислу) розуміється здатність матеріалу або деталі чинити опір не тільки руйнуванню, але й настанню текучості, втрати стійкості, поширенню тріщин та інше.

Під міцністю (у науковому смислу) розуміється тільки досягнення межі текучості металу.

Критерії міцності

Найважливішим завданням інженерного розрахунку є оцінка міцності елементів машин і споруд за відомим напруженим станом. Найпростіше ця задача розв'язується для одновісних напружених станах, оскільки у цих випадках граничні (небезпечні) напруження можуть бути визначені безпосередньо експериментально. Небезпечними вважають напруження, при яких починається руйнування (при крихкому стані матеріалу) або виникають залишкові деформації (при пластичному стані матеріалу). Випробування зразків матеріалу на одновісне розтягування дозволяє визначити небезпечні напруження: $\sigma_H = \sigma_T$ або $\sigma_H = \sigma_B$.

За небезпечні напруження беруть допустимі напруження при розтягуванні $[\sigma_+]$ або при стисканні $[\sigma_-]$. Умова міцності для одновісного напруженого стану має вигляд $\sigma_1 \leq [\sigma_+]$, або $\sigma_3 \leq [\sigma_-]$. При складних напружених станах, якщо в точках деталей дві чи всі три головних напруження $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ не дорівнюють нулю, небезпечний стан може настати при різних граничних значеннях головних напружень $\sigma_{1H}, \sigma_{2H}, \sigma_{3H}$ залежно від їх співвідношень. Експериментально визначити граничні значення головних напружень дуже важко внаслідок складності випробувань зразків в умовах неодновісних напружених станів та з великим обсягом випробувань. Розв'язання цієї задачі відбувається у визначенні на підставі теоретичних і практичних досліджень

критерію міцності (критерію граничного напружено – деформованого стану). При цьому розглядається переважний вплив на міцність матеріалу того чи іншого фактора і вважають, що порушення міцності матеріалу при будь-якому напруженому стані відбувається тільки тоді, коли певний фактор досягне певного граничного значення. Отже, введення критерію міцності дає змогу порівняти певний складний напружений стан із простим і знайти при цьому таке еквівалентне напруження, яке в обох випадках дає однаковий коефіцієнт запасу. Під коефіцієнтом запасу в загальному випадку напруженого стану розуміють число n , що показує, у скільки разів потрібно одночасно збільшити всі компоненти напруженого стану $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, щоб він став граничним $\sigma_{1n} = n\sigma_1$; $\sigma_{2n} = n\sigma_2$; $\sigma_{3n} = n\sigma_3$. Курс “Опір матеріалів” розглядає чотири теорії міцності.

Перша теорія міцності (критерій найбільших нормальних напружень)

Згідно з цією теорією, переважний вплив на міцність має значення найбільшого нормального напруження. Припускається, що руйнування матеріалу в загальному випадку напруженого стану виникає тоді, коли найбільше нормальне напруження досягає небезпечного значення σ_n і яке визначається при простому розтягуванні. Умова порушення міцності при складному напруженому стані має вигляд:

$$\sigma_1 = \sigma_{+n}; \quad \sigma_3 = \sigma_{-n}.$$

Умова міцності з коефіцієнтом запасу n :

$$\sigma_1 \leq \sigma_{+n}, \text{ або } \sigma_3 \leq \sigma_{-n}, \text{ де } \sigma_{\pm n} = \sigma_n / n. \quad (1.1)$$

$$\sigma_1 = \sigma_{+n} / n \quad \sigma_3 = \sigma_{-n} / n.$$

Отже, цей критерій з трьох головних напружень урахує лише одне – найбільше, вважаючи, що два інших не впливають на міцність. Ця теорія не відбиває умов виникнення пластичних деформацій і дає задовільні результати лише для дуже крихких матеріалів.

Друга теорія міцності (критерій найбільших лінійних деформацій)

Згідно з цією теорією, критерієм міцності вважають найбільшу за абсолютним значенням лінійну деформацію і припускають, що руйнування матеріалу в загальному випадку напруженого стану виникає тоді, коли найбільше лінійне відносне подовження $\varepsilon_{\max}$ досягає небезпечного значення

ε_H , яке визначають при простому розтягуванні або стисканні зразків із даного матеріалу. Умова руйнування має вигляд $\varepsilon_{\max} = \varepsilon_H$, а умова міцності з коефіцієнтом запасу n :

$$\varepsilon_{\max} \leq \varepsilon = \frac{\varepsilon_H}{n}. \quad (1.2)$$

Використовуючи узагальнений закон Гука для 3-вісного напруженого стану умову міцності виразимо через напруження. Приймаючи найбільше лінійне відносне подовження за ε_1 , отримаємо:

$$\varepsilon_{\max} = \varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \leq \frac{\varepsilon_H}{n}. \quad (1.3)$$

Якщо при простому розтягуванні допустиме напруження дорівнює $\sigma_{\text{доп}}$, то для найбільшого відносного подовження допустима величина:

$$\varepsilon_{\text{доп}} = \sigma_{\text{доп}} / E.$$

$$\text{Тоді } \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \leq \frac{\sigma_{\text{доп}}}{E} \text{ або } [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \leq \sigma_{\text{доп}}.$$

Згідно з цією теорією, з допустимим напруженням слід порівнювати комбінацію з трьох головних напружень, а еквівалентне напруження буде дорівнювати:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3). \quad (1.4)$$

Дослідна перевірка цієї теорії свідчить про узгодженість результатів лише для крихкого стану (наприклад, для легованих чавунів та високоміцних сталей). Застосування цієї теорії міцності недопустимо для матеріалів, які не відповідають закону Гука, або тих, що перебувають за межу пропорційності.

Третя теорія міцності (критерій найбільших дотичних напружень)

Згідно з цією теорією, за критерій міцності вважають найбільше дотичне напруження і припускають, що граничний стан у загальному випадку напруженого стану виникає тоді, коли найбільше дотичне напруження $\tau_{\max}$ досягає небезпечного значення τ_H , яке визначають при досягненні граничного стану при простому розтягуванні зразків із даного матеріалу.

Умова руйнування має вигляд

$$\tau_{\max} = \tau_n,$$

$$\text{умова міцності} \quad - \quad \tau_{\max} \leq \tau_n / n. \quad (1.5)$$

Оскільки $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$, а $\tau_n = \frac{1}{2} \sigma_n$, то умови руйнування і міцності можна виразити через головні напруження:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_n; \quad \sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_n.$$

Отже, еквівалентним напруженням за цією теорією є різниця алгебраїчно найбільшого і найменшого головних напружень:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sigma_1 - \sigma_3. \quad (1.6)$$

Ця теорія добре підтверджується дослідями для пластичних матеріалів, у яких допустимі напруження на розтягування і стискання однакові. Недолік цієї теорії – вона не враховує головне напруження σ_2 , яке справляє деякий (хоча і незначний) вплив на міцність матеріалу. Критерій найбільших дотичних напружень розглядає умову утворення пластичних (залишкових) деформацій. Вважаючи граничним станом наявність текучості, маємо:

$$\sigma_T = \sigma_1 - \sigma_3. \quad (1.7)$$

Ця умова достатньо задовільно описує початок появи пластичної деформації при складному напруженому стану для багатьох металів і сплавів.

Четверта теорія міцності(критерій питомої потенціальної енергії деформації)

За критерій міцності вибирають кількість питомої потенціальної енергії формозміни, накопиченої деформованим елементом. Згідно з цією теорією, небезпечний стан (текучість) у загальному випадку напруженого стану виникає тоді, коли питома потенціальна енергія формозміни досягає свого граничного значення, яке легко визначити при простому розтягуванні в момент настання текучості.

Умова настання текучості:

$$U_{\phi} = U_{\phi.T.}$$

Умова міцності:

$$U_{\phi} \leq U_{\phi.T.}$$

Припускаючи, що закон Гука справедливий аж до настання граничного стану, можна питому потенціальну енергію формозміни у загальному випадку напруженого стану записати у вигляді

$$U_{\phi} = \frac{1+\mu}{3E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] .$$

При простому розтягуванні в момент текучості ($\sigma_1 = \sigma_T$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) маємо:

$$U_{\phi.T} = \frac{1+\mu}{3E} \sigma_T^2 . \quad (1.8)$$

Отже умова настання текучості перетвориться на таку:

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)} = \sigma_T ,$$

або
$$\sqrt{\frac{1}{2} [\sigma_1 - \sigma_2]^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_T .$$

Умова міцності має вигляд

$$\sqrt{\frac{1}{2} [\sigma_1 - \sigma_2]^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq \sigma_T / n = \sigma_{\text{екв}} . \quad (1.9)$$

Отже еквівалентне напруження за даною теорією

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{1}{2} [\sigma_1 - \sigma_2]^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} . \quad (1.10)$$

Цей вираз збігається з виразом для інтенсивності напружень σ_i . Досліді добре підтверджують цю теорію для пластичних матеріалів при розтягуванні і стисканні. Ця теорія міцності дає змогу встановити умови початку не тільки пластичних деформацій, а й руйнування.

Види руйнувань

Розрізняють наступні види руйнування – пластичне, крихке та утомлене.

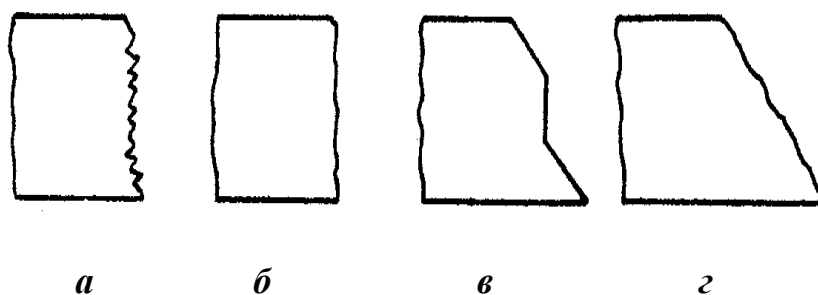
В'язке (пластичне) руйнування супроводжується значною пластичною деформацією металу, що протікає за всім об'ємом тіла або в його значній частині і є результатом вичерпання здатності матеріалу чинити опір пластичній деформації й притаманне для пластичних матеріалів. При пластичному руйнуванні швидкість поширення тріщини мала і становить не

більш ніж 0,05 швидкості звуку. Колір зламу – матовий.

Крихке руйнування викликає лише сліди пластичної деформації. Злам – кристалічний з характерними блискучими гранями окремих площин руйнування. При крихкому руйнуванні швидкість поширення тріщини становить 0,2...0,5 швидкості звуку. Напівкрихке (квазікрихке) руйнування має ділянки з в'язким і крихким видом зламу. Воно відбувається в найбільш ослабленому перетині (перед краєм тріщини) при напруженні вище межі текучості σ_T , але менше межі міцності σ_B .

Утомлене руйнування відбувається при досить малих пластичних деформаціях за рахунок повільного поширення тріщини утоми при повторно-змінному циклічному навантаженні шляхом накопичення в матеріалі необоротного пошкодження. При цьому тріщини в матеріалі починають розвиватися задовго до повного руйнування незалежно від того, пластичне це буде руйнування чи крихке. У зоні утомленої тріщини злам має гладку матову поверхню. Тривалість процесу руйнування займає більше 90% часу "життя" деталі.

Форма поверхні руйнування листового металу, що виникла від статичного або ударного навантаження, наведена на рис.1.2.



*а – в'язке; б – крихке; в – з ділянками зрізу у поверхонь пластини;
г – шляхом зрізу*

Рисунок 1.2 – Види руйнувань листового металу

Роботоздатність

Роботоздатність – здатність конструкції чинити опір настанню тих граничних станів, які обмежують її нормальну експлуатацію (ураховуються крім діючих навантажень також і умови їхньої експлуатації: корозійна стійкість, герметичність, опір потоку й ін.)

Коефіцієнти запасу

Установлений коефіцієнт запасу повинен компенсувати можливі відхилення декількох параметрів: навантаження, властивостей металу, перети-

нів елементів й інших. Запас міцності – це відношення яких-небудь двох однотипних величин, одна з яких відповідає настанню граничного стану, а друга – стану експлуатації:

$$K = \frac{P_{гран}}{P_{експл}}; \quad K = \frac{f_{гран}}{f_{експл}}; \quad K = \frac{\sigma_T}{\sigma_D}; \quad (1.11)$$

Наприклад, відношення величини навантаження, що викликає граничний стан $P_{гран}$, до величини експлуатаційного навантаження $P_{експл}$; відношення прогинів – граничного $f_{гран}$ і експлуатаційного $f_{експл}$; відношення напружень – текучості σ_T і діючого σ_D і т.д.

Розрізняють необхідне (установлене) і фактичне значення коефіцієнтів запасу. Необхідне значення коефіцієнта запасу формується під впливом як технічних, так і економічних, організаційних, кон'юктурних й інших факторів. Вони регламентовані нормативними документами й виступають у неявному виді допустимого напруження, значення якого нижче напруження, що відповідає виникненню граничного стану. Він може бути також указаний у вигляді конкретного числа. Нормативне значення межі текучості σ_T і тимчасового опору σ_B використовуються для наступного визначення за ними розрахункових або допустимих напружень.

При установленні потрібних коефіцієнтів запасу необхідно користуватися такими поняттями, як часткові та фактичні коефіцієнти запасу, а також і повний коефіцієнт запасу.

Потрібні часткові коефіцієнти запасу встановлюються директивним шляхом і вони ніякому розрахунковому визначенню не підлягають і є числами, які показують у скільки разів їхні нормативні значення повинні бути змінені для усунення можливих несприятливих відхилень.

Фактичні коефіцієнти запасу визначаються експериментально, або розрахунковим шляхом. Вони обчислюються порівнянням однорідних характеристик. При розтягуванні зразка силою P (рис.1.3) часткові коефіцієнти запасу сили й напруження можуть бути визначені за формулою

$$K = \frac{P_p}{P_e},$$

де P_p – розрахункова сила;

P_e – експлуатаційна сила.

$$K = \frac{\sigma_T}{\sigma_B},$$

де σ_T - межа текучості, МПа;

σ_B – тимчасовий опір, МПа.

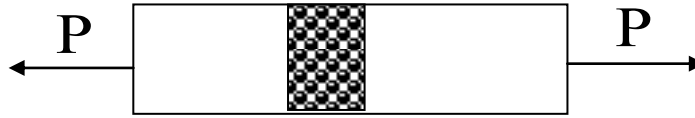


Рисунок 1.3 – Схема розтягування зразка силою P

При наявності тріщини в зразку (рис.1.4) часткові коефіцієнти запасу можуть бути визначені за формулами:

$$K_L = \frac{L_{\text{крит}}}{L_{\text{експл}}}; \quad K_{\text{ін}} = \frac{K_{\text{руйн}}}{K_{\text{експл}}}; \quad (1.12)$$

де $L_{\text{крит}}$ – критична довжина тріщини;

$L_{\text{експл}}$ – експлуатаційна довжина тріщини;

K_L – коефіцієнт запасу міцності у залежності від довжини тріщини;

$K_{\text{ін}}$ – коефіцієнт запасу у залежності від коефіцієнтів інтенсивності напружень;

$K_{\text{руйн}}$ – коефіцієнт інтенсивності при руйнуючому напруженні;

$K_{\text{експл}}$ – коефіцієнт інтенсивності при експлуатаційному напруженні.

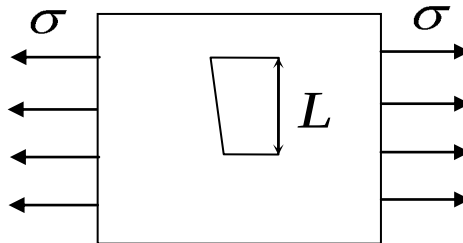


Рисунок 1.4 – Зразок із тріщиною

Поряд з частковими коефіцієнтами розрізняють й повні коефіцієнти запасу міцності. Повний коефіцієнт запасу міцності $K_{\text{міцн}}^{\text{повн}}$ показує у скі-

льки разів можливе відхилення якого-небудь із параметрів для досягнення критичного стану, якщо інші параметри вважати незмінними.

Розглянемо на прикладі розрахунок напускного зварного з'єднання з кутовими швами, що передає експлуатаційну силу P_e .

Якщо параметри входять до першого степеня, то повний коефіцієнт запасу міцності дорівнює добутку часткових потрібних коефіцієнтів запасу міцності, які є числами, що показують у скільки разів їх нормативні значення мають бути змінені для вилучення їх можливих відхилень:

$$[n] = [n]_p \times [n]_\tau \times [n]_F, \quad (1.13)$$

де $[n]_p = P_{розр}/P_e$; $[n]_\tau = \tau_p/[\tau]$; $[n]_F = F_{пр}/F_{розр}$

де $P_{розр}$ – розрахункова сила;

P_e – експлуатаційна сила;

τ_p – нормативне мінімальне значення міцності швів на зріз;

$[\tau]$ – допустиме напруження зрізу (розрахункове) у швах;

$F_{пр}$ – проектний перетин шва, указаний на кресленнях;

$F_{розр}$ – розрахунковий перетин шва.

Тоді розрахункова формула для визначення необхідного (проектного) перетину шва має вигляд

$$F_{пр} = \frac{P_e \times [n]_p \times [n]_\tau \times [n]_F}{\tau_p \times L}, \quad (1.14)$$

де L – довжина периметра швів зварного з'єднання.

На рисунку 1.5 наведене стикове зварне з'єднання з непроваром.

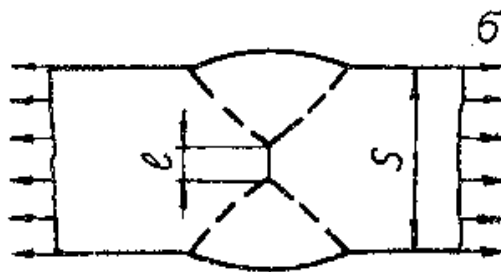


Рисунок 1.5 – Зразок з непроваром

При його розрахунку на опірність руйнуванню при чутливості металу до концентрації напружень визначають критичне напруження за формулою, що має ступеневий вигляд:

$$\sigma_c = \frac{K_c}{A \sqrt{\ell}}, \quad (1.15)$$

де σ_c – критичне напруження, при якому відбувається руйнування;

K_c – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень;

ℓ – характерний розмір непровару за товщиною металу S ;

A – чисельний коефіцієнт, який відображає розташування непровару або тріщини у з'єднанні, значення якого наведено у довідковій літературі.

Нехай будуть задані необхідні коефіцієнти запасу навантаження $[n]_p$, механічної характеристики $[n]_k$, можливого відхилення від установленого розміру непровару $[n]_\ell$. Тоді розрахункова формула для визначення експлуатаційного допустимого напруження має вигляд:

$$\sigma_e = \frac{K_c}{[n]_k \times [n]_p \times A \sqrt{\ell} \times [n]_\ell}. \quad (1.16)$$

У цьому випадку повний коефіцієнт запасу відносно K_c і σ_e має одне значення, але відносно ℓ – інше.

$$\text{Для } K_c \text{ і } \sigma_e - [n]_1 = [n]_k \times [n]_p \times [n]_\ell^{\frac{1}{2}}, \quad (1.17)$$

$$\text{для } \ell - [n]_2 = [n]_k \times [n]_p \times [n]_\ell, \quad (1.18)$$

де $[n]_1$ і $[n]_2$ – повні коефіцієнти запасу.

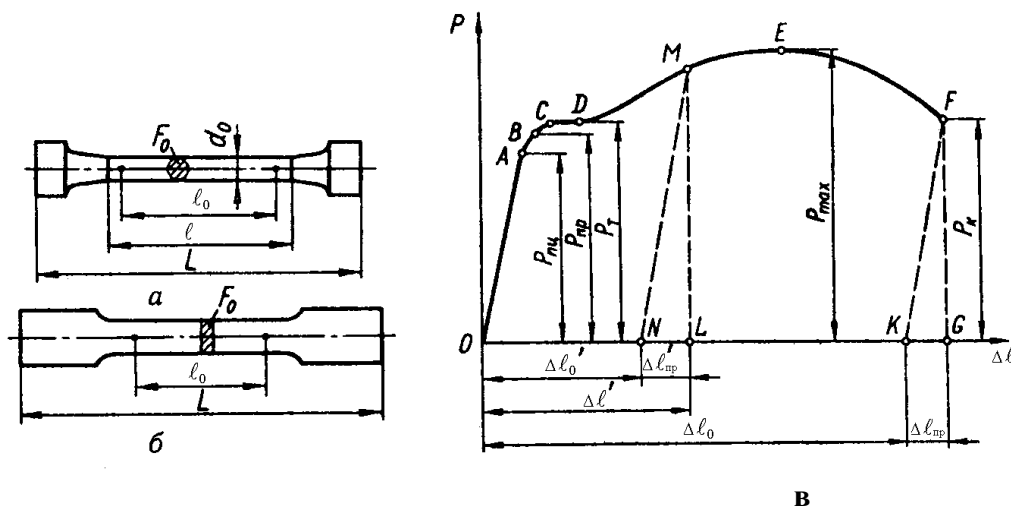
Найчастіше в експериментах визначають фактичний коефіцієнт запасу як повний коефіцієнт запасу того параметра, що визначають під час досліду. Наприклад, якщо при випробуванні реєструється руйнівне навантаження P_p зварного з'єднання з кутовими швами, а механічні властивості й розміри катетів швів відповідають нормативним значенням, то відношення P_p/P_e дає повний коефіцієнт запасу міцності.

2 ОСНОВИ ТЕОРІЇ ПРУЖНОСТІ Й ПЛАСТИЧНОСТІ

2.1 Властивості металів при одновісьовому розтягуванні

Під час проектування й розрахунків на міцність, твердість і стійкість елементів механізмів, машин і конструкцій необхідно знати властивості матеріалів. Визначення деяких механічних властивостей металів проводиться, використовуючи прості схеми навантаження – розтягування, стиск, крутіння.

Одним з основних видів дослідження матеріалів є випробування на розтягування, при якому визначаються найбільш важливі їхні властивості. Для досліджень матеріалу виготовляють спеціальні циліндричні або плоскі зразки (рис. 2.1 а,б). У цих зразках має бути витримане співвідношення між розрахунковою довжиною зразка ℓ_0 і діаметром d_0 : у коротких зразків – $\ell_0 = 5d_0$, у довгих – $\ell_0 = 10d_0$. Випробування на розтягування дозволяє визначити силу й деформацію зразка, що їй відповідає. При розтягуванні одержують діаграму залежності умовних напружень $\sigma = P/F_0$ від умовних деформацій $\delta = \Delta \ell / \ell_0$, використовуючи силу P , первинну площу F_0 , подовження зразка $\Delta \ell$ і первинну розрахункову довжину зразка ℓ_0 (рис. 2.1 а, б).



а - вид циліндричного зразка для випробування на розтягування;

б - вид плоского зразка для випробування на розтягування;

в - вид діаграми розтягування

Рисунок 2.1 – Вид зразків і діаграми розтягування низьковуглецевої

сталі в координатах P - $\Delta \ell$

Розглянемо характерні ділянки й точки цієї діаграми.

Точка А. Від початку навантаження до визначеного значення розтягальної сили, має місце пряма пропорційна залежність між подовженням і силою. Напруження, що викликане силою пропорційності $P_{\text{пц}}$, називається межею пропорційності й дорівнює

$$\sigma_{\text{пц}} = P_{\text{пц}}/F_0. \quad (2.1)$$

На ділянці ОА справедливий закон Гука.

Точка В. Найбільше напруження, до якого залишкова деформація (пружна деформація) при розвантаженні не виявляється, називається межею пружності й дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = P_{\text{пр}}/F_0, \quad (2.2)$$

де $P_{\text{пр}}$ – сила пружності.

Точка С. При подальшому розтягуванні зразка від точки В крива розтягування стає криволінійною й плавно піднімається до точки С, де спостерігається перехід до горизонтальної ділянки СД. Межа текучості σ_T - це найменше напруження, при якому деформація зразка відбувається при постійній розтягальній силі P_T і дорівнює

$$\sigma_T = P_T/F_0. \quad (2.3)$$

Під час пластичної деформації підвищується температура зразка, змінюється його електропровідність і магнітні властивості.

Ділянка СД. На цій стадії розтягування подовження зразка зростає при постійному значенні розтягальної сили. Такий процес деформації зветься текучістю матеріалу й супроводжується залишковим (пластичним) подовженням, що не зникає після розвантаження.

Ділянка ДЕ – ділянка зміцнення. Після стадії текучості матеріал знову отримує здатність збільшувати опір подальшої деформації й сприймає зростаючу до деякої межі силу.

Точка Е. Найбільша сила, яку сприймає зразок. Напруження, що відповідає максимальній силі P_{max} , називається тимчасовим опором σ_B , або межею міцності й дорівнює

$$\sigma_B = P_{\text{max}}/F_0. \quad (2.4)$$

До цього моменту подовження зразка розподілялося рівномірно за всією довжиною ℓ_0 зразка; площі поперечних перетинів розрахункової

частини зразка змінювалися незначно й також рівномірно за його довжиною. Тому у формули уведене первинне значення площі F_0 .

Після досягнення $P_{\max}$ при подальшому розтягуванні зразка деформація відбувається, головним чином, на невеликій довжині зразка. Це утворює місцеве звуження у вигляді шийки й знижує сили P_K , незважаючи на те, що напруження в перетині шийки безупинно зростає.

Точка F характеризує умовне напруження в момент розриву, що дорівнює

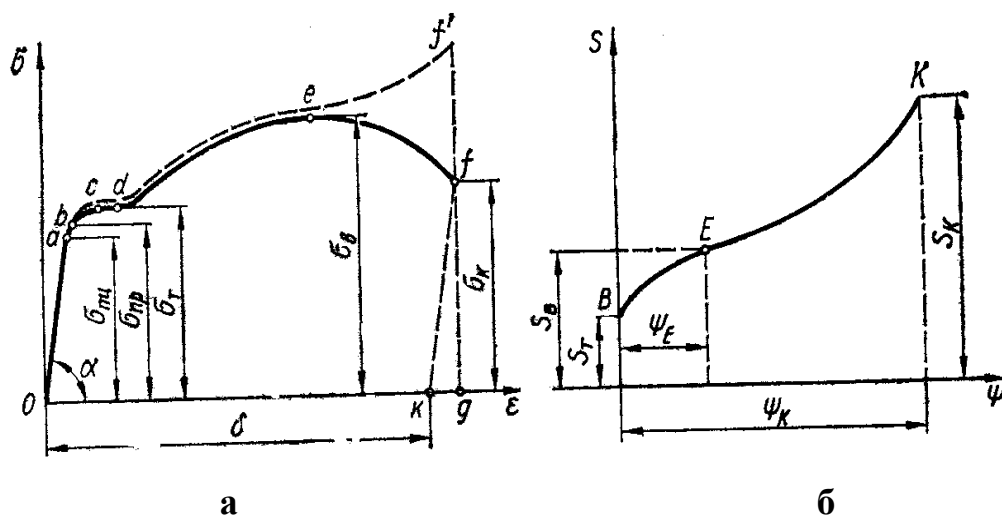
$$\sigma_F = P_K / F_0, \quad (2.5)$$

де P_K – величина руйнуючої сили у момент розриву, при цьому використовується первісна площа F_0 , яка не відповідає дійсній і яка значно менша через шийку.

Діаграма розтягування у координатах $\sigma - \epsilon$

Вид діаграми розтягування в координатах $P - \Delta \ell$ залежить не тільки від властивостей матеріалу, але й від розміру випробуваного зразка. Діаграма, що характеризує тільки механічні властивості матеріалу, виходить перебудовою первинної діаграми розтягування в координатах $\sigma - \epsilon$

(рис.2.2, а), де $\sigma = P/F_0$, а $\epsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0}$.



а – вид діаграми у координатах $\sigma - \epsilon$;
б – вид кривої, що відповідає дійсним напруженням при розтягуванні низьковуглецевої сталі

Рисунок 2.2 – Вид діаграми розтягування низьковуглецевої сталі в координатах $\sigma - \epsilon$, $S - \psi$

Точки о, а, в, с, d, е, f відповідають точкам О, А, В, С, Д, Е, F діаграми $P-\Delta \ell$ (див. рис.2.1). З діаграми $\sigma - \varepsilon$ видно, що $\operatorname{tg} \alpha = \sigma / \varepsilon = E$, тобто модуль пружності при розтягуванні дорівнює тангенсу кута нахилу прямолінійної ділянки діаграми до вісі абсцис. Після утворення шийки відносна подовжня деформація розподіляється за довжиною зразка не рівномірно, і дійсна діаграма розтягування будується в координатах: відносне звуження поперечного перетину в шийці Ψ , яке відповідає дійсному напруженню S , де $\Psi = (F_0 - F_k)/F_0$; $S = P_i / F_i$, а P_i й F_i – відповідно, сила й найменша площа поперечного перетину зразка в момент випробування (рис.2.2, б).

Крива, що відповідає дійсним напруженням при розтягуванні зображена на рис.2.2,б. Точка В відповідає початку виникнення залишкової деформації й відповідає дійсному напруженню – межі текучості. Точка Е відповідає максимальній силі $P_{\max}$, що витримує зразок під час випробування. За нею визначається дійсний тимчасовий опір (межа міцності). Абсциса точки К являє найбільше звуження перетину Ψ_k , а ордината – відповідне дійсне напруження в момент розриву S_k . З цієї діаграми видно, що опір пластичному деформуванню зростає аж до настання руйнування.

Розвантаження й повторне навантаження

Якщо при силі розтягування, що викликало напруження і яке не перевищувало межу пружності припинити навантаження і розвантажити зразок, то його подовження повністю зникає. Буде інакше, якщо до початку розвантаження напруження в зразку перевищує межу пружності. Виконавши розвантаження, помітимо, що цей процес на діаграмі описується вже не за кривою, що збігається із кривою навантаження ОАВСДМ (рис.2.1, в), а за прямою MN, паралельною прямолінійній ділянці ОА діаграми. Повне подовження зразка за межею пружності складається із двох частин – пружної й пластичної ($\Delta \ell_0$):

$$\Delta \ell = \Delta \ell_{\text{пр}} + \Delta \ell_0.$$

Попереднє розтягування за межею текучості підвищує межу пропорційності й зменшує залишкове подовження після розриву й робить його більш коротким. Подовження $\Delta \ell$ при розвантаженні цілком не зникне, тому що

$$\Delta \ell' = \Delta \ell'_{\text{пр}} + \Delta \ell'_{\text{о}},$$

де $\Delta \ell'_{\text{о}}$, – частина подовження зразка, що залишилася за межею пружності.

Якщо знову почати навантажувати зразок, який був розтягнутий силою пружності, що викликала в ньому напруження вище σ_{T} , а потім розвантажити, то виявиться, що лінія повторного навантаження майже збігається з лінією розвантаження MN. Межа пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$ підвищиться й стане приблизно рівною тому напруженню, до якого спочатку був розтягнутий зразок. При подальшому збільшенні Р крива діаграми збіжиться з МЕФ. Частина діаграми, яка розташована ліворуч від лінії MN, виявиться відсіченою, тобто початок координат переміститься в точку N. Залишкове подовження після розриву зразка буде менше ніж у зразку, що не піддавався попередній пластичній деформації. Таким чином, попередня витяжка зразка за межею текучості підвищує $\sigma_{\text{пц}}$ і зменшує залишкове подовження після розриву, тобто робить його більш крихким. Ця зміна властивостей матеріалу за межею текучості називається наклепом.

Так буде аж до розриву зразка, коли пружна складова повного подовження в обох частинах зразка (відрізок $\Delta \ell'_{\text{пр}}$) зникає. Подовження, що залишилося – відрізок $\Delta \ell'_{\text{о}}$.

Відносне подовження й звуження після розриву зразка

Повне подовження, що отримане зразком після руйнування, зменшиться після розриву, тому що в частинах зразка зникнуть пружні деформації. Відносним подовженням після розриву δ називають відношення у відсотках приросту розрахункової довжини зразка після розриву до його початкової довжини:

$$\delta = (\Delta \ell / \ell_0) 100 \% . \quad (2.6)$$

Відносне звуження зразка після розриву ψ визначається відношенням абсолютного зменшення площі поперечного перетину у відсотках від початкової площі поперечного перетину:

$$\psi = \frac{\Delta F}{F_0} 100 \% . \quad (2.7)$$

Відносне подовження δ і відносне звуження ψ характеризують пластичність матеріалу і є умовними, тому що подовження й звуження відносяться до первинної довжини й до первинної площі зразка. У дійсності пластична деформація розвивається на безупинно змінювальній довжині зразка. Позначивши збільшення довжини зразка у цей момент випробування, знаходимо відповідне дійсне подовження:

$$\varepsilon = \int_{\ell_o}^{\ell_k} \frac{d\ell}{\ell} = \ln \frac{\ell_k}{\ell_o} = \ln \frac{\ell_o + \Delta\ell}{\ell_o} = \ln(1 + \delta), \quad (2.8)$$

де $\delta = \Delta\ell / \ell_o$.

При розкладанні правої частини в ряд за ступенями δ одержимо:

$$\varepsilon = \ln(1+\delta) = \delta - \delta^2/2 + \delta^3/3 - \dots$$

При малих змінах δ умовна й відповідна їй дійсна деформація практично збігаються. Так, при $\delta = 10\%$, $\varepsilon = 9,95\%$. Подібним чином визначимо дійсне звуження:

$$\psi_d = - \int_{F_o}^{F_k} \frac{dF}{F} = \ln \frac{F_o}{F_k} = \ln \frac{F_o}{F_o - \Delta F} = \ln \frac{1}{1 - \psi}, \quad (2.9)$$

де $\psi = \Delta F / F_o$.

Тому що об'єм тіла під час пластичної деформації не змінюється,

то $F_o \ell_o = F_k \ell_k$, або $\frac{\ell_k}{\ell_o} = \frac{F_o}{F_k}$, тобто $\psi_d = \varepsilon$.

Будь-яке збільшення довжини щодо вихідної бази зразка викличе відповідне зменшення діаметра бази зразка.

Необхідність визначення відповідної дійсної деформації впливає з факту, що вона в будь-який заданий момент часу залежить від довжини бази зразка ℓ_i в той же момент часу. Отже, фіксована зміна довжини $\Delta\ell_i$ приводить до постійно зменшуваного збільшення деформації, тому що довжина бази зразка ℓ_i в цей момент часу зростає з кожним додатковим збільшенням $\Delta\ell$.

Крім того, можливе визначення дійсної деформації стрижня, якщо

розглянути повну зміну його довжини незалежно від того, чи була ця деформація за рахунок одноразового розтягування, або набором послідовних прикладань навантаження, тобто

$$\varepsilon_{\text{повн}} = \varepsilon_{\text{заг}} ,$$

де $\varepsilon_{\text{заг}}$ – деформація при багаторазовому прикладанні навантаження.

Приклад: розтягування стрижня у два прийоми.

Складання умовних відносних деформацій ($\delta_1 + \delta_2$) не буде дорівнювати величині загальної відносної деформації $(\ell_2 - \ell_0) / \ell_0$:

$$\frac{\ell_1}{\ell_0} - \frac{\ell_0}{\ell_0} + \frac{\ell_2}{\ell_1} - \frac{\ell_1}{\ell_1} = \frac{\ell_1}{\ell_0} + \frac{\ell_2}{\ell_1} - 2 ,$$

але при складанні дійсних деформацій ($\varepsilon_1 + \varepsilon_2$) повна відносна деформація $\varepsilon_{\text{повн}}$ буде дорівнювати $\varepsilon_{\text{заг}}$.

$$\ln(\ell_1 / \ell_0) + \ln(\ell_2 / \ell_1) = \ln\left(\frac{\ell_2}{\ell_1} \cdot \frac{\ell_1}{\ell_0}\right) = \ln(\ell_2 / \ell_0) = \varepsilon_{\text{заг}} .$$

Деформації – безрозмірні. Відношення абсолютної подовжньої деформації елемента до його початкової довжини в напрямку вісі X зветься відносною подовжньою деформацією:

$$\varepsilon_{\text{прод}} = \frac{\Delta \ell}{\ell} = \varepsilon_x . \quad (2.10)$$

Відношення абсолютної поперечної деформації елемента до його початкового поперечного розміру зветься відносною поперечною деформацією (рис.2.3):

$$\varepsilon_{\text{попер}} = -\frac{\Delta b}{b} , \quad \varepsilon_{\text{попер}} = -\frac{\Delta h}{h} . \quad (2.11)$$

Коефіцієнт Пуассона μ – абсолютне значення відношення відносної поперечної деформації до відносної подовжньої деформації при розтягуванні або стиску на ділянці пружності, на якій діє закон Гука:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_{\text{попер}}}{\varepsilon_{\text{прод}}} \right| . \quad (2.12)$$

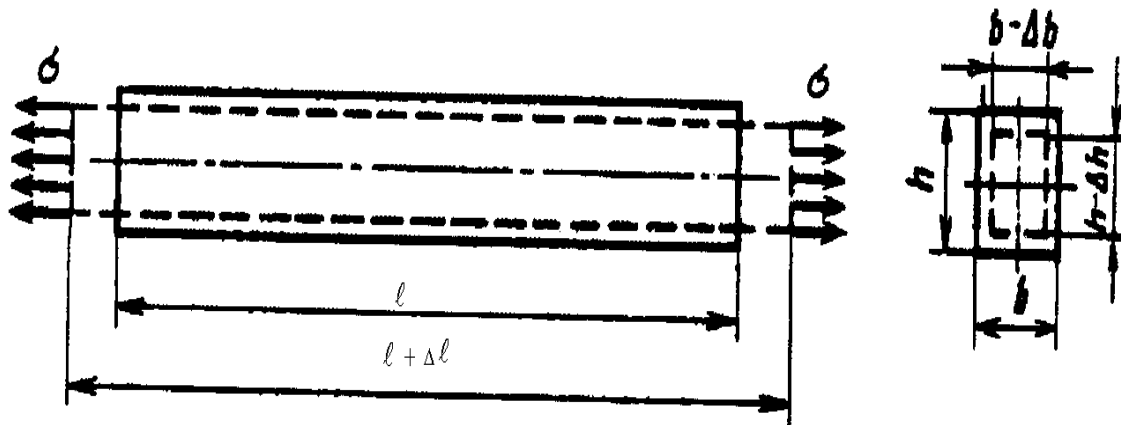


Рисунок 2.3 – Поперечні деформації стрижня

Коефіцієнт поперечної деформації (коефіцієнт Пуассона) у межах пружних деформацій:

$$\mu = \varepsilon_{\text{поп}} / \varepsilon_{\text{прод}} = (0,25 \dots 0,30); \quad \varepsilon_{\text{поп}} = -\mu \varepsilon_{\text{прод}}.$$

Повна деформація складається із пружної й пластичної:

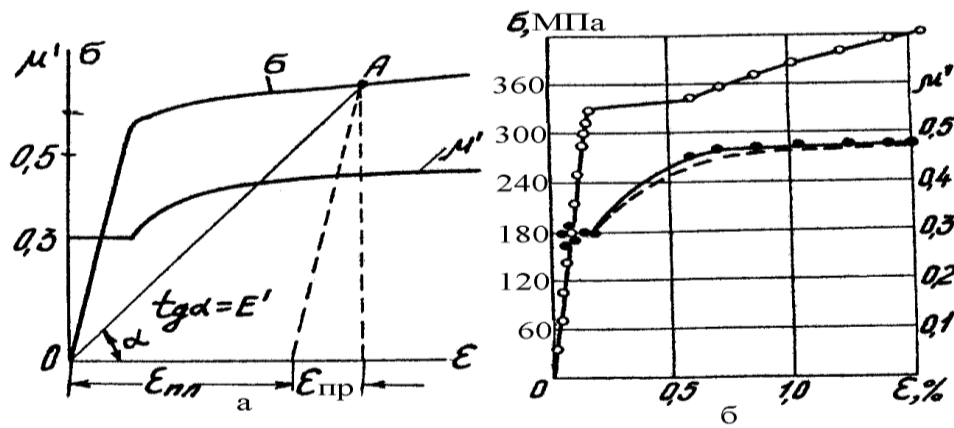
$$\varepsilon_{\text{повн}} = \varepsilon_{\text{пр}} + \varepsilon_{\text{пл}}. \quad (2.13)$$

За межею пружності збільшення подовжніх пластичних деформацій викликає поперечну деформацію з коефіцієнтом 0,5, у той час як збільшення пружних деформацій продовжує викликати поперечні деформації з коефіцієнтом μ . За межею пружності поперечна деформація визначається за формулою

$$\varepsilon_{\text{поп}} = -(\mu \varepsilon_{\text{прод}} + 0,5 \varepsilon_{\text{пл}}). \quad (2.14)$$

Тому коефіцієнт Пуассона за межею пружності (μ') змінюється в міру зросту пластичної деформації від μ до 0,5 (рис.2.4), тому що при зростанні пластичної деформації відношення $\varepsilon_{\text{пр}} / \varepsilon_{\text{повн}}$ прагне до одиниці, у той час як $\varepsilon_{\text{пл}} / \varepsilon_{\text{повн}}$ прагне до нуля.

$$\mu' = -\frac{\varepsilon_{\text{поп}}}{\varepsilon_{\text{повн}}} = -\left[\mu \left(\frac{\varepsilon_{\text{пр}}}{\varepsilon_{\text{повн}}} \right) + 0,5 \left(\frac{\varepsilon_{\text{пл}}}{\varepsilon_{\text{повн}}} \right) \right]. \quad (2.15)$$



а – схема розрахунку μ' ;

б – результати для сталі 30

Рисунок 2.4 – Діаграма розтягування і графічні залежності коефіцієнта поперечної деформації від величини повної деформації [1]

Закон незмінюваності об'єму при пластичній деформації:

$$\varepsilon_{\text{хпл}} + \varepsilon_{\text{упл}} + \varepsilon_{\text{зпл}} = 0, \quad (2.16)$$

де $\varepsilon_{\text{хпл}}$, $\varepsilon_{\text{упл}}$, $\varepsilon_{\text{зпл}}$ – відповідні дійсні пластичні деформації у напрямку координатних вісей X,Y,Z.

Робота деформації

Крім уже названих характеристик механічних властивостей матеріалу, діаграма розтягування дозволяє визначити ще й енергетичні його характеристики.

Площа діаграми розтягування в координатах $P-\Delta \ell$ [] характеризує роботу, яку витрачено на розрив зразка. Нехай деякій розтягувальній силі P відповідає деформація λ зразка (рис. 2.5).

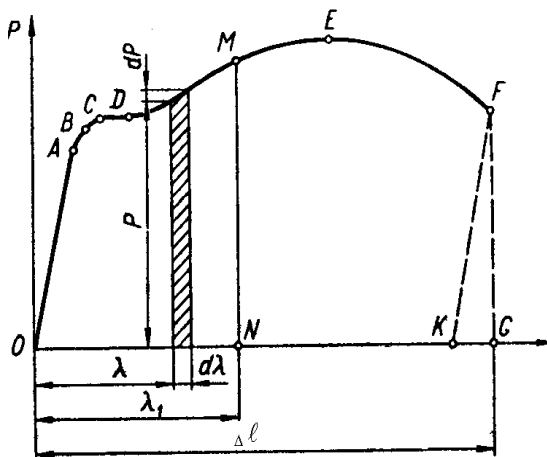


Рисунок 2.5

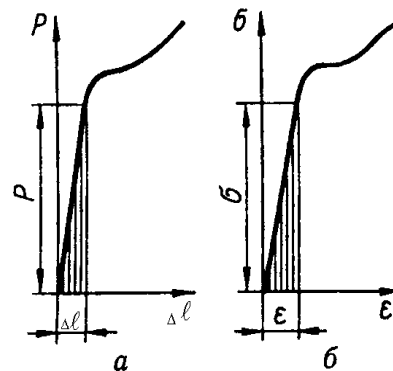


Рисунок 2.6

При нескінченно малому прирості dP приріст деформації буде $d\lambda$. Робота зовнішніх сил на цьому переміщенні:

$$dA = (P + dP)d\lambda = Pd\lambda.$$

Робота, яку витрачено на розтягування зразка до подовження λ_1 ,

$$A = \int_0^{\lambda_1} Pd\lambda.$$

Із рисунка 2.5 видно, що робота, яку витрачено на розрив зразка, дорівнюватиме всій площі $OABCDEFGO$ діаграми розтягування. У межах пружності повна робота деформації визначається площею трикутника (рис.2.6, а):

$$A_{\text{пр}} = \frac{P \times \Delta \ell}{2}. \quad (2.17)$$

Питома робота деформації $a_{\text{пр}}$, тобто робота, яку витрачено на деформування одениці об'єму матеріалу, визначається за формулою

$$a_{\text{пр}} = A / V,$$

де

$$V = F_0 \ell_0,$$

тоді

$$a_{\text{пр}} = \frac{P \times \Delta \ell}{2 F_0 \ell_0} = \frac{\sigma \varepsilon}{2}. \quad (2.18)$$

Питома робота деформації у межах пружності визначається площею трикутника на діаграмі $\sigma - \varepsilon$ і характеризує здатність матеріалу чинити опір ударній дії навантаження: чим більша питома робота деформації до розриву, тим краще матеріал чинить опір ударним навантаженням.

Вплив швидкості навантаження на деформацію

При збільшенні швидкості прикладеного навантаження, що відповідає зросту напруження й деформації, усі матеріали, що перебувають у пластичному стані, збільшують опір деформуванню. Чим вище швидкість деформування, тим вище межа текучості й тимчасовий опір.

Порівняння результатів статичного й динамічного випробування низьковуглецевих сталей при нормальній температурі (рис.2.7) указує на наступне:

- крива 1 динамічного розтягування лежить вище кривої 2 статичного розтягування;
- тимчасовий опір під час динамічного навантаження підвищується, але менше ніж межа текучості (див.рис.2.8);
- максимум діаграми для динамічного навантаження зміщується у бік початку діаграми (див. рис.2.7, 2.9).

Швидкість навантаження впливає на вид діаграми (див.рис.2.9). Напруження σ_T , σ_B зростають із підвищенням швидкості навантаження, а деформації, які відповідають межі міцності в точці руйнування, зменшуються. Ділянка текучості при високих швидкостях зникає. Для металів вплив швидкості навантаження помітний лише при значній її різниці.

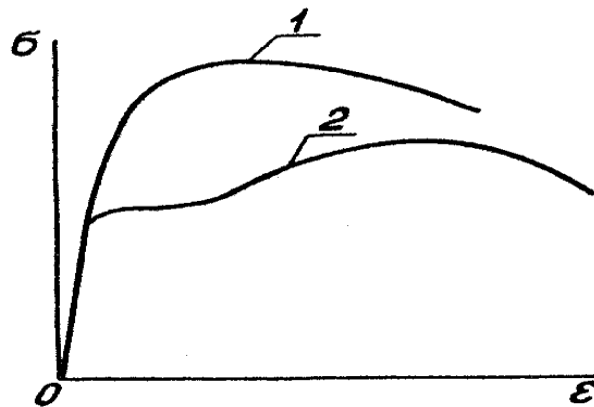


Рисунок 2.7 – Вплив статичного (2) й динамічного (1) навантаження на діаграму розтягування сталі

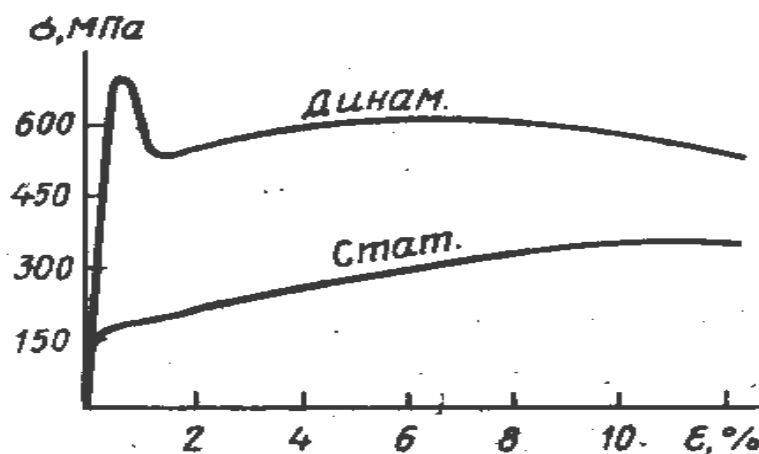


Рисунок 2.8 – Вплив статичного й динамічного навантаження на діаграму розтягування низьковуглецевої сталі

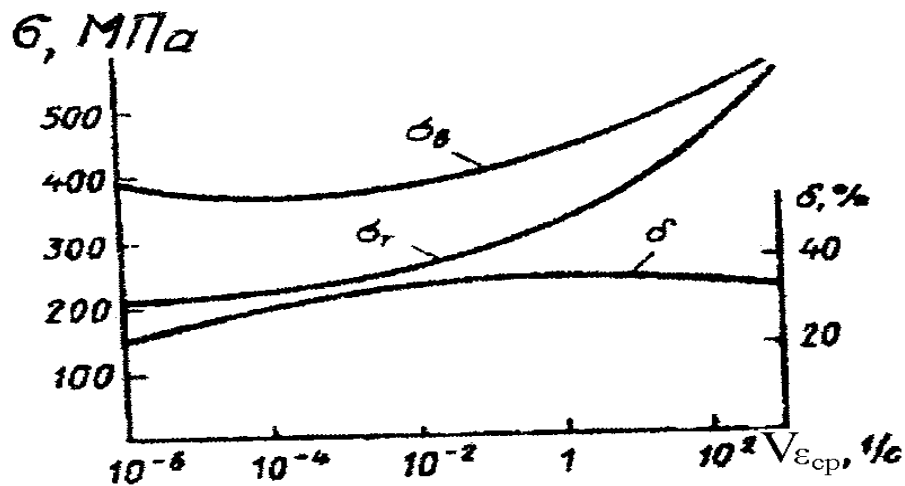


Рисунок 2.9 – Вплив швидкості деформації $V_{\varepsilon cp}$ на механічні характеристики низьковуглецевої сталі

2.2 Напруження у точці

Напруження є наслідком взаємодії частинок тіла при його навантаженні. Зовнішні сили намагаються змінити взаємне розміщення частинок, а напруження, що виникають при цьому, перешкоджають зміщенню частинок, обмежуючи його здебільше деякою малою величиною.

Відповідно до гіпотези про суцільність матеріалу необхідно вважати, що кожна частинку тіла в скільки завгодно малому околі в усіх напрямках оточують безліч інших частинок. Розміщена в даній точці частинка порізно-му взаємодіє з кожною із цих сусідніх частинок. Тому в одній і тій самій точці в різних напрямках напруження різні і дуже рідко, коли вони однакові в усіх напрямках.

З курсу “Опір матеріалів” [5] відомо, що дев'ять компонентів напруження у 3-х взаємноперпендикулярних площинах, що проходять через розглянуту точку тіла, повністю визначають напружений стан у цій точці (тензор напружень), де в першому, другому й третьому рядках розташовані складові напружень, відповідно, на площинах, перпендикулярних до осей X, Y, Z :

$$\begin{array}{ccc} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z. \end{array}$$

Звичайно для зображення напруженого стану в точці тіла в околиці останньої виділяють елемент об'єму у вигляді прямокутного паралелепіпеда, три ребра якого беруться за вісі координат (рис.2.10)

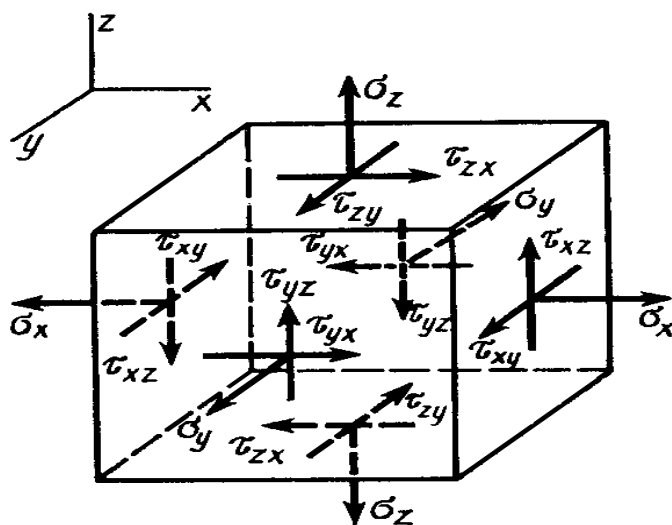


Рисунок 2.10 – Вид прямокутного паралелепіпеда і діючих на його гранях напружень

Нормальні напруження позначаються σ з індексом, що відповідає напрямку нормалі до площини, на якій вони діють. Дотичні напруження позначаються τ з двома індексами: перший відповідає напрямку нормалі до площини, а другий – напрямку самого напруження. Наприклад, на площині, перпендикулярній до вісі X , діють напруження σ_x , τ_{xy} , τ_{xz} і т.д. Дотичні напруження вважаються позитивними, якщо вони спрямовані убік відповідних позитивних напрямків координатних осей. Якщо зовнішня нормаль до ділянки збігається з негативним напрямком координатної вісі, то всі три складові напруження на площадці вважаються позитивними, якщо вони спрямовані убік негативних напрямків відповідних координатних осей.

При неодновісьовому напруженому стані в кожній точці тіла маємо σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} і деформації ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z , γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{zx} .

Характеристиками напруженого й деформованого стану є σ_i – інтенсивність напружень, ϵ_i – інтенсивність деформацій, які визначаються за формулами:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}; \quad (2.19)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}.$$

У кожній точці тіла існують принаймні три взаємно перпендикулярні площини, у яких дотичні напруження дорівнюють нулю. Ці площини називаються головними, а нормальні напруження і деформації у них – головними нормальними напруженнями і деформаціями:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}; \quad (2.20)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}.$$

Головні напруження σ_1 , σ_2 і σ_3 розташовуються у такому порядку:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3.$$

2.3 Теорії напружено-деформованого стану тіла. Енергетична теорія пластичності

Дана теорія приймає, що пластичні деформації при об'ємонапруженому стані виникають при досягненні інтенсивності напружень межі текучості:

$$\sigma_i = \sigma_T, \quad (2.21)$$

де σ_T – межа текучості.

При 3-вісному розтягуванні або стиску окремі компоненти можуть помітно перевершувати σ_T металу, але при цьому $\sigma_i < \sigma_T$ і пластичні деформації не виникнуть.

При 2-вісному напруженому стані, коли $\sigma_1 = -\sigma_3$, а $\sigma_2 = 0$, що відповідає чистому зсуву, пластичні деформації почнуться при максимальному напруженні $\sigma_i = \sigma_T / \sqrt{3} < \sigma_T$.

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - 0)^2 + (0 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{6\sigma_1^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{3} \sqrt{2} \sigma_1.$$

$\sigma_i = \sqrt{3} \sigma_1 = \sigma_T$; $\sigma_1 = \sigma_T / \sqrt{3}$. Для одновісного розтягування $\sigma_1 = \sigma$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$,

Для одновісьового розтягування $\sigma_1 = \sigma$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$,

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_1^2 + 0 + \sigma_1^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2\sigma_1^2} = \sigma_1 = \sigma_T.$$

Деформаційна теорія пластичності

Для розрахунків напруженого стану за межами пружних деформацій використовується деформаційна теорія пластичності: для різних напружених станів металу береться однакова експериментальна залежність між напруженнями й деформаціями. Деформаційна теорія пластичності встановлює єдиний зв'язок між інтенсивністю напружень σ_i й інтенсивністю деформацій ε_i незалежно від схеми напруженого стану:

$$\sigma_i = f(\varepsilon_i), \text{ або } \sigma = \varepsilon E, \quad (2.22)$$

де E – модуль пружності.

Для простого (одновісьового) розтягування відносна подовжня деформація дорівнює $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$, а відносна поперечна деформація

$$\varepsilon' = -\mu \frac{\sigma}{E}.$$

Ці два рівняння виражають закон Гука (залежність між деформаціями й напруженнями) при лінійному напруженому стані.

Розглянемо залежність між деформаціями й напруженнями для об'ємного напруженого стану. Візьмемо паралелепіпед розміром $a \times b \times c$ (рис.2.11, а).

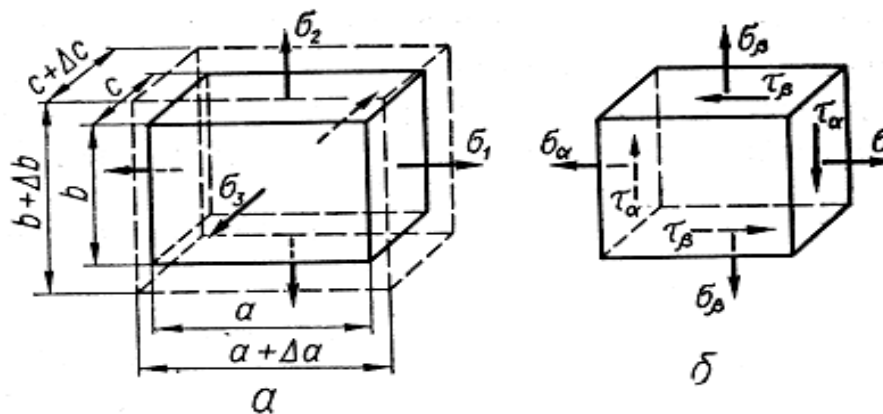


Рисунок 2.11 – Вид прямокутного паралелепіпеда (а) і діючих на його гранях напружень (б)

Через деформацію ребра елементи змінять свою довжину й стануть рівними $a + \Delta a$; $b + \Delta b$; $c + \Delta c$.

Головні відносні подовження будуть дорівнювати:

$$\varepsilon_1 = \Delta a/a; \quad \varepsilon_2 = \Delta b/b; \quad \varepsilon_3 = \Delta c/c,$$

де $\Delta a/a$, $\Delta b/b$, $\Delta c/c$ – відносні подовження у головних напрямках.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon'_1 + \varepsilon''_1 + \varepsilon'''_1,$$

де ε'_1 – відносне подовження у напрямку σ_1 , викликане дією тільки напруженням σ_1 ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$);

ε''_1 – відносне подовження в тому ж напрямку, викликане дією тільки напруженням σ_2 ;

ε'''_1 – відносне подовження в тому ж напрямку, викликане дією тільки напруженням σ_3 .

У зв'язку з тим, що напрямок σ_1 для самого напруження σ_1 є подовжнім, а для напружень σ_2 і σ_3 – поперечним, знаходимо:

$$\varepsilon'_1 = \frac{\sigma_1}{E}; \quad \varepsilon''_1 = -\mu \frac{\sigma_2}{E}; \quad \varepsilon'''_1 = -\mu \frac{\sigma_3}{E};$$

$$\text{або} \quad \varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \mu \frac{\sigma_2}{E} - \mu \frac{\sigma_3}{E} = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)];$$

Подібним чином отримаємо формули і для інших головних подовжень:

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \mu(\sigma_3 + \sigma_1)]; \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)].$$

Це є узагальнений закон Гука для випадку 3-вісного напруженого стану.

Залежність середньої деформації від середнього напруження має вигляд:

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3} = \frac{1}{3E} (\sigma_1 - \mu\sigma_2 - \mu\sigma_3) + \frac{1}{3E} (\sigma_2 - \mu\sigma_3 - \mu\sigma_1) + \\ &+ \frac{1}{3E} (\sigma_3 - \mu\sigma_1 - \mu\sigma_2) = \frac{1-2\mu}{3E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{(1-2\mu)}{E} \sigma_0, \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\text{де} \quad \sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}; \quad \sigma_0 = \frac{E \cdot \varepsilon_0}{1 - 2\mu}; \quad (2.25)$$

$$\sigma_0 = \varepsilon_0 \cdot K; \quad (2.26)$$

де K – об'ємний модуль пружності й дорівнює

$$K = \frac{E}{1 - 2\mu}. \quad (2.27)$$

При одновісному розтягуванні $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, тому $\sigma_0 = \sigma_1/3 = \sigma/3$.

Зв'язок між напруженнями й деформаціями в будь-якій точці має вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_x - \sigma_0 &= \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot (\varepsilon_x - \varepsilon_0); & \tau_{xy} &= \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i} \cdot \gamma_{xy}; \\ \sigma_y - \sigma_0 &= \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (\varepsilon_y - \varepsilon_0); & \tau_{yz} &= \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i} \cdot \gamma_{yz}; \\ \sigma_z - \sigma_0 &= \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (\varepsilon_z - \varepsilon_0); & \tau_{zx} &= \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i} \cdot \gamma_{zx}; \end{aligned} \quad (2.28)$$

Установимо зв'язок між відносним змінням об'єму ε_v і головними напруженнями. До деформації елемент займав об'єм $V_0 = a \times b \times c$. У деформованому стані його об'єм визначиться із рівняння

$$\begin{aligned} V &= (a + \Delta a)(b + \Delta b)(c + \Delta c) = (a \times b \times c)(1 + \Delta a/a)(1 + \Delta b/b)(1 + \Delta c/c) = \\ &= V_0(1 + \varepsilon_1)(1 + \varepsilon_2)(1 + \varepsilon_3) = V_0(1 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_1 \times \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \times \varepsilon_3 + \\ &+ \varepsilon_3 \times \varepsilon_1 + \varepsilon_1 \times \varepsilon_2 \times \varepsilon_3). \end{aligned}$$

Ураховуючи мале значення відносних лінійних деформацій, останніми чотирма членами можна знехтувати. Тоді відносна зміна об'єму буде:

$$\varepsilon_v = \frac{V - V_0}{V_0} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3. \quad (2.29)$$

Виразивши головні подовження через головні напруження згідно з формулою (2.24) отримаємо:

$$\varepsilon_v = \frac{1 - 2\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3). \quad (2.30)$$

З формули (2.30) випливає, що при деформуванні тіла, матеріал якого має коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,5$, об'єм тіла не змінюється.

З формул, наведених вище, і графічної залежності σ_i від ε_i (рис.2.12,а) або від $\int d\varepsilon_{\text{пл}}$ (рис.2.12,б) можна за відомими деформаціями обчислити напруження й навпаки, при відомих напруженнях обчислити деформації.

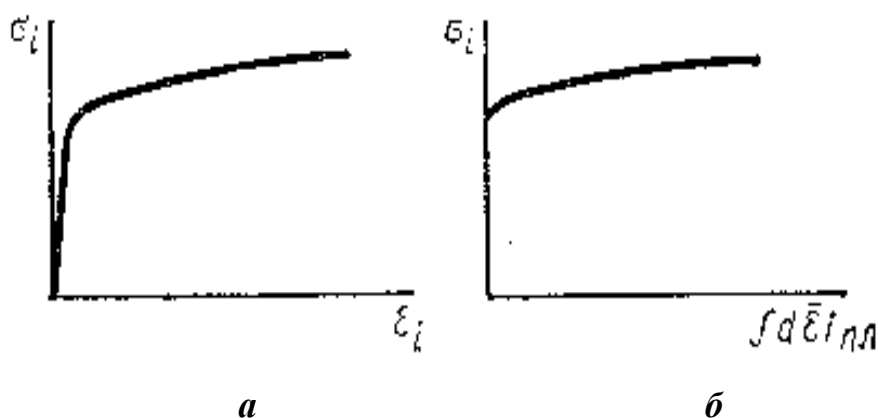


Рисунок 2.12 – Діаграми залежності σ_i від ε_i , якими користуються у теорії пластичності

Для наближеного аналітичного опису діаграм розтягування, коли пружною деформацією в порівнянні із пластичною можна знехтувати, використовується залежність

$$\sigma_i = A \cdot \varepsilon_{\text{пл}}^n, \quad (2.31)$$

де A і n - постійні для конкретного матеріалу.

Показник ступеня n зміцнення матеріалу при пластичній деформації для вуглецевих і низьколегованих сталей у незміцненому стані дорівнює 0,25...0,30; для сталей високої міцності $n = 0,05...0,10$. Підвищення міцності металу звичайно супроводжується зменшенням n . Незміцнений ідеально пружнопластичний матеріал має $n = 0$. Показник n не є мірою пластичності металу, але чим менше його значення, тим менше пластичність.

Якщо відома точка стану на діаграмі $\sigma_i - \varepsilon_i$, то можна визначити інтенсивність пружних і пластичних деформацій, використовуючи співвідношення

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \sigma_i / 3G, \quad (2.32)$$

де G - модуль зсуву, що дорівнює

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} . \quad (2.33)$$

Знаючи $\varepsilon_{i\text{пл}}$, можна обчислити складову пластичних деформацій:

$$\varepsilon_{x\text{пл}} = 2/3 \varepsilon_{i\text{пл}} / \sigma_i (\sigma_x - \sigma_0); \quad (2.34)$$

$$\gamma_{z\text{пл}} = (3 \varepsilon_{i\text{пл}} / \sigma_i) \tau_{zx}. \quad (2.35)$$

Теорія течії

Більш точною є теорія течії, що встановлює єдиний зв'язок між інтенсивністю напружень σ_i й інтегралом $\int d\varepsilon_{i\text{пл}}$ інтенсивності збільшень пластичних деформацій незалежно від схеми напруженого стану. Величина $d\varepsilon_{i\text{пл}}$ може бути знайдена із загальної залежності для багатовісьового навантаження:

$$d\varepsilon_{i\text{пл}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_{x\text{пл}} - d\varepsilon_{y\text{пл}})^2 + (d\varepsilon_{y\text{пл}} - d\varepsilon_{z\text{пл}})^2 + (d\varepsilon_{z\text{пл}} - d\varepsilon_{x\text{пл}})^2 + \frac{3}{2}(d\gamma_{xy\text{пл}}^2 + d\gamma_{yz\text{пл}}^2 + d\gamma_{zx\text{пл}}^2)}; \quad (2.36)$$

де $d\varepsilon_{x\text{пл}}$, $d\varepsilon_{y\text{пл}}$,... - збільшення пластичних деформацій на нескінченно малій ділянці деформування.

При одновісьовому розтягуванні $d\gamma = 0$. Тоді, відповідно до формули (2.16):

$$\varepsilon_{x\text{пл}} + \varepsilon_{y\text{пл}} + \varepsilon_{z\text{пл}} = 0; \quad (2.37)$$

$$d\varepsilon_{y\text{пл}} = d\varepsilon_{z\text{пл}} = -1/2 d\varepsilon_{x\text{пл}} = -1/2 d\varepsilon_{\text{пл}}.$$

Із рівняння (2.36) одержуємо:

$$d\varepsilon_{i\text{пл}} = d\varepsilon_{x\text{пл}}; \quad (2.38)$$

$$\int_0^{\varepsilon_{n\text{л}}} d\varepsilon_{i\text{пл}} = \varepsilon_{x\text{пл}} = \varepsilon_{\text{пл}} \quad (2.39)$$

2.4 Плоский напряженный стан і плоска деформація. Плоский напряженный стан ($\sigma_z = 0$; $\varepsilon \neq 0$)

Плоска пластина навантажена в її площині (рис.2.13, а). Товщина δ дуже мала в порівнянні з розмірами a й c . Якщо виділити елемент із розмірами dx , dy і δ у будь-якій точці пластини, то на його гранях виникнуть напруження $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ і τ_{yx} (рис.2.13, б) .

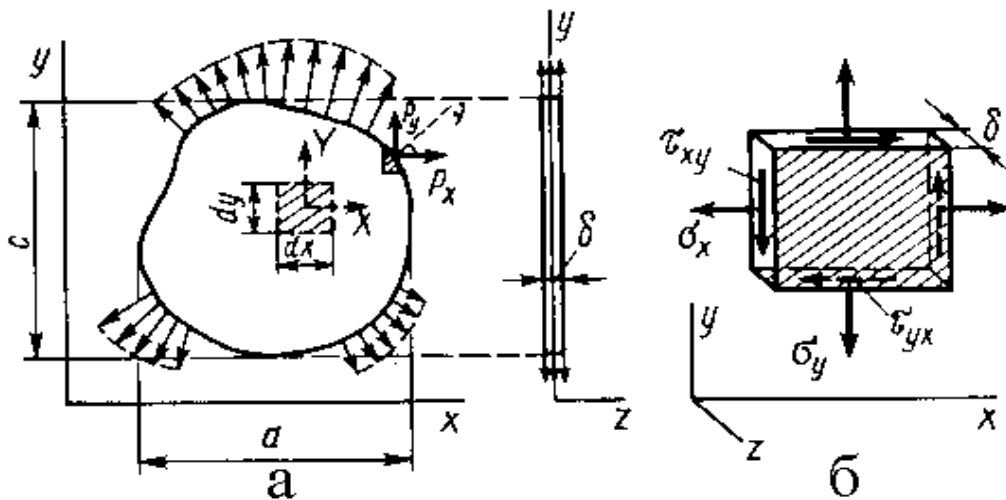


Рисунок 2.13 – Схема визначення плоского напруженого стану

На бічних гранях цього елемента напруження відсутні: $\sigma_z = 0$; $\tau_{zx} = 0$; $\tau_{zy} = 0$, і ми маємо плоский напряжений стан тіла, тобто дві паралельні грані нескінченно малого елемента, виділеного в будь-якій точці тіла, вільні від напружень.

Напруження σ_x , σ_y , τ_{xy} і τ_{yx} рівномірно розподілені за товщиною пластини.

При плоскому напруженому стані за законом Гука деформація у напрямку товщини пластини дорівнює:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \mu\sigma_x - \mu\sigma_y) = -\frac{\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) .$$

Товщина пластини в кожній точці внаслідок поперечної деформації змінюється на величину $\Delta\delta = \varepsilon_z \delta = -\frac{\mu\delta}{E} (\sigma_x + \sigma_y) .$

Плоска деформація ($\varepsilon_z = 0$; $\sigma_z \neq 0$)

Маємо дуже довге циліндричне тіло, рівномірно навантажене за всією довжиною "В" (рис.2.14, а). Умовно розсічемо це тіло на окремі шари товщиною $\delta = 1$. Якби ці шари випробовували плоский напружений стан, то в кожній точці пластини товщина змінювалася б на величину $\Delta\delta$. Але, завдяки взаємодії сусідніх шарів, це неможливо, тому кожний шар деформується в умовах (рис.2.14, б), де шар як би затиснутий між двома абсолютно твердими поверхнями, примусово забезпечуючими умови незмінюваності товщини шару $\Delta\delta = 0$. При цьому переміщення у всіх точках тіла відбувається тільки в паралельних площинах XY (рис.2.14, в). Тому що W, U, V не залежать від Z, маємо:

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial W}{\partial X} + \frac{\partial U}{\partial Z} = 0; \quad \gamma_{zy} = \frac{\partial W}{\partial Y} + \frac{\partial U}{\partial Z} = 0; \quad \tau_{zy} = \tau_{zx} = 0.$$

Це і є плоска деформація. За законом Гука маємо:

$$\varepsilon_z = (\sigma_z - \mu\sigma_x - \mu\sigma_y)/E = 0.$$

У місцях, де пластина повинна була товщати, з'являються стискаючі напруження σ_z , а в місцях можливого стоншення – розтягальні напруження σ_z . У обох випадках:

$$\sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y). \quad (2.40)$$

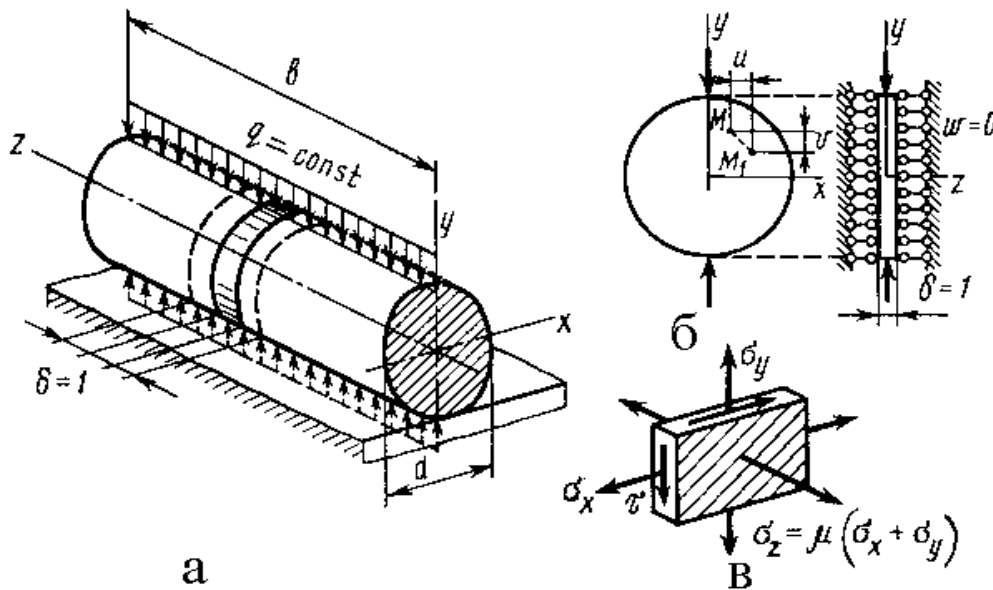


Рисунок 2.14 – Схема визначення плоскої деформації

2.5 Приклади і їх рішення

Приклад 1. За відомими напруженнями обчислити деформації в заданій точці А.

За формулою (2.25) знаходимо σ_0 і підставляємо у формули (2.28). Значення ε_i визначається, використовуючи експериментальну діаграму залежності σ_i від ε_i (рис.2.13), попередньо обчисливши σ_i за формулою (2.19). Отримані дані підставляються у залежності (2.28) і визначаються $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$.

Приклад 2. Стрижень довжиною 25см і діаметром 0,3 см розтягується навантаженням 5000Н. Діаметр стрижня зменшився до 0,25 см. Визначити дійсні напруження й деформації, умовні напруження й деформації, умовні й дійсні звуження.

Із залежності $F_0 l_0 = F_1 l_1$ визначаємо кінцеву довжину стрижня:

$$l_1 = F_0 \times l_0 / F_1 = \frac{\frac{\pi}{4} (0,3)^2}{\frac{\pi}{4} (0,25)^2} \cdot 25 = 36 \text{ см}.$$

Дійсні напруження й деформації при заданому навантаженні будуть, відповідно, дорівнюватися:

$$\sigma_d = P / F_1 = \frac{5000 \times 4}{3,14 \times (2,5 \times 10^{-3})^2} = 1019 \text{ МПа},$$

$$\varepsilon_d = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) = \ln \frac{36}{25} = 0,365 = 36,5\%.$$

Умовні напруження й деформації при заданому навантаженні будуть дорівнюватися:

$$\sigma_{ум} = \frac{P}{F_0} = \frac{5000 \times 4}{\pi (3 \times 10^{-3})^2} = 708 \text{ МПа},$$

$$\varepsilon_{ум} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{36 - 25}{25} = 0,44 = 44\%.$$

Відносне (умовне) і дійсне звуження при заданому навантаженні дорівнюють:

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} = \frac{7,065 - 4,9}{7,065} = 0,306 = 30,6\%,$$

$$\psi_D = \ln \frac{F_0}{F_1} = \ln \frac{7,065}{4,9} = 0,365 = 36,5\%.$$

Приклад 3. Зразок випробовується на повзучість і навантажений силою 6000 Н. Вихідна довжина круглого стрижня становила 300 мм, а вихідний діаметр 5 мм. Після випробувань довжина зразка склала 350 мм. Визначити дійсні напруження й деформації; умовні напруження й деформації, відносне і дійсне подовження.

Знаходимо діаметр стрижня після випробувань:

$$F_0 l_0 = F_1 l_1;$$

$$F_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} = \frac{3,14 \times 5^2}{4} = 19,62 \text{ мм}^2;$$

$$F_1 = \frac{F_0 l_0}{l_1} = \frac{19,62 \times 300}{350} = 16,82 \text{ мм}^2;$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4F_1}{3,14}} = \sqrt{\frac{4 \times 16,82}{3,14}} = 4,63 \text{ мм}.$$

Дійсні напруження й деформації при заданому навантаженні будуть, відповідно, дорівнювати:

$$\sigma_D = \frac{P}{F_1} = \frac{6000}{16,82} = 356,7 \text{ МПа},$$

$$\varepsilon_D = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln \frac{350}{300} = 0,154 = 15,4\%.$$

Умовні напруження й деформації при заданому навантаженні будуть, відповідно, дорівнювати:

$$\sigma_{ум} = \frac{P}{F_0} = \frac{6000}{19,62} = 305,8 \text{ МПа},$$

$$\varepsilon_{ум} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{350 - 300}{300} = 0,167 = 16,7\%.$$

Відносне (умовне) і дійсне звуження дорівнюють:

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} = \frac{19,62 - 16,82}{19,62} = 0,143 = 14,3\%,$$

$$\psi_d = \ln \frac{F_0}{F_1} = \ln \frac{19,62}{16,82} = 0,154 = 15,4\%.$$

Приклад 4. По гранях елемента внаслідок навантаження діють напруження: $\sigma_1 = 350$ МПа, $\sigma_2 = 200$ МПа, $\sigma_3 = 150$ МПа. Приймаючи значення модуля пружності $E = 206 \cdot 10^3$ МПа і коефіцієнта Пуассона $\mu = 0,3$, визначити еквівалентні напруження при одновісному, двовісному і об'ємній дії напружень і деформації при тривісній дії напружень.

У загальному виді еквівалентні напруження й деформації визначаються формулами:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2};$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}.$$

При об'ємному (тривісному) навантаженні:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(350 - 200)^2 + (200 - 150)^2 + (150 - 350)^2} = 180,3 \text{ МПа}.$$

При двовісному навантаженні: ($\sigma_2 = 0$; $\sigma_3 = \sigma_1 = 350$ МПа):

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(350 - 0)^2 + (0 - 350)^2 + (350 - (-350))^2} = 606,1 \text{ МПа}.$$

При одновісному навантаженні ($\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = 0$):

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(350 - 0)^2 + (0 - 0)^2 + (0 - 350)^2} = 350 \text{ МПа}.$$

Узагальнений закон Гука для тривісного напруженого стану має ви-

гляд:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \mu \frac{\sigma_2}{E} - \mu \frac{\sigma_3}{E} = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)]$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \mu(\sigma_3 + \sigma_1)]$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)]$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2,06 \cdot 10^5} [50 - 0,3(200 + 150)] = 0,00119;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2,06 \cdot 10^5} [0 - 0,3(150 + 350)] = 0,000243;$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{2,06 \cdot 10^5} [50 - 0,3(350 + 200)] = -0,000073.$$

Еквівалентна деформація:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(11,9 \times 10^{-4} - 2,43 \times 10^{-4})^2 + (2,43 \times 10^{-4} - (-0,7 \times 10^{-4}))^2 + (-0,7 \times 10^{-4} - 11,9 \times 10^{-4})^2} = 0,00076.$$

Об'ємна деформація:

$$\varepsilon_v = \frac{1 - 2\mu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1 - 2 \cdot 0,3}{2,06 \cdot 10^5} (350 + 200 + 150) = 0,00136 ;$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 1,19 \cdot 10^{-3} + 0,24 \cdot 10^{-3} + (-0,07 \cdot 10^{-3}) = 0,0013.$$

Приклад 5. Брус щільно вставлений між двома нерухомими стінками й підлягає стиску рівномірно розподіленим за горизонтальними гранями силою P (рис. 2.15).

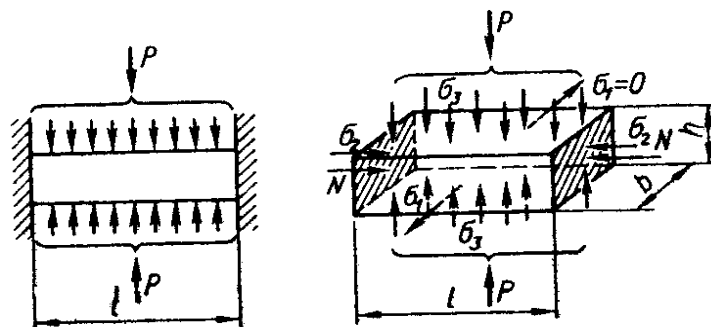


Рисунок 2.15

Нехтуючи тертям між брусом і стінками, знайти зусилля тиску на його стінки й зміну його розмірів при $P = 10000 \text{ Н}$, $E = 2 \cdot 10^7 \text{ Н/см}^2$; $\ell = 50 \text{ см}$; $b = 25 \text{ см}$; $h = 10 \text{ см}$.

Напруження тиску, які виникають у поздовжньому напрямку є наслідком дії вертикального навантаження, тому що брус не може переміщатися у горизонтальному напрямку (перешкоджають нерухомі стінки). Тоді маємо:

$$\sigma_1 = 0; \quad \sigma_2 = -N/bh; \quad \sigma_3 = -P/b\ell.$$

Через N позначимо тиск стінок на брус. Тому що в умовах прикладу розмір ℓ не змінюється, то $\varepsilon_2 = 0$. Тоді з формули $\varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \mu\sigma_3) = 0$ знаходимо:

$$\sigma_2 = \mu\sigma_3 = -\frac{\mu P}{b\ell}.$$

Тоді

$$N = -bh\sigma_2 = -bh(-\mu P/b\ell) = \frac{\mu Ph}{\ell}.$$

Зміна розмірів бруса складе:

$$\Delta b = \varepsilon_1 b = -\frac{b\mu}{E}(\sigma_2 + \sigma_3) = \frac{\mu(1+\mu)P}{E\ell} = \frac{0,3(1+0,3) \times 10^4}{2 \times 10^7 \times 50} = 3,9 \times 10^{-6} \text{ см.};$$

$$\Delta h = \varepsilon_3 h = \frac{h}{E}(\sigma_3 - \mu\sigma_2) = -(1-\mu^2) \frac{Ph}{bE\ell} = -(1-0,3^2) \frac{10^4 \times 10}{25 \times 50 \times 2 \times 10^7} = -3,64 \times 10^{-6} \text{ см}$$

Відносна зміна об'єму бруса складе:

$$\varepsilon_v = \frac{1-2\mu}{E} \left(0 - \frac{\mu P}{bL} - \frac{P}{b\ell}\right) = \frac{-(1-2\mu)(1+\mu)}{bE\ell} P = -\frac{0,4 \times 1,3 \times 10^4}{25 \times 50 \times 2 \times 10^7} = -0,208 \cdot 10^{-6}.$$

Зміна об'єму бруса складе:

$$\begin{aligned} \Delta V &= \varepsilon_v V = \varepsilon_v b h \ell = -(1-2\mu)(1+\mu) \frac{Ph}{E} = \\ &= -(1-2 \times 0,3)(1+0,3) \frac{10^4 \times 10}{2 \times 10^7} = -0,26 \times 10^{-2} \text{ мм}^3 \end{aligned}$$

3 ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

3.1 Механізм впливу концентраторів на розподіл напружень і деформацій [2]

Вплив концентраторів напружень на роботоздатність конструкцій великий. Це головний фактор, що істотно знижує міцність. Нерівномірність розподілу напружень у деталях і зварних з'єднань впливає на їх несучу здатність. Із самого визначення випливає, що напруження розподіляються нерівномірно. Унаслідок концентрації напружень текучість металу в окремих точках може з'являтися значно раніше, ніж за перетином в цілому. Однак, настання текучості в окремих точках деталей ще не є тим граничним станом, на яке орієнтуються при розрахунку зварних конструкцій. Загальна ж текучість перетину виникає при більш високих навантаженнях, що є позитивним. Найбільший негативний вплив концентрації напружень проявляється на досягнення граничного стану руйнування при навантаженнях: вібраційних, повторно статичних, ударних і статичних.

Заведено говорити про концентрацію напружень. Однак більше значення в пружнопластичній стадії навантаження має концентрація деформацій.

Розглянемо широку пластину одиничної товщини, яка має щілиноподібний надріз глибиною h і радіусом r (рис.3.1, а). Виділимо умовно ділянку h , що знаходиться вище кореня надрізу (рис. 3.1, б). Напруження σ створюють силу $P = \sigma h$ (при $\delta = 1$), яка врівноважується сумою дотичних

напружень $\int_0^h \tau dx$, тоді $\sigma h = \int_0^h \tau dx$. Такі ж дотичні напруження, але проти-

лежного знаку діють на іншу частину полоси (рис.3.1, в) і створюють нерівномірні напруження σ_x . Чим більше h при постійному r , тим більше

$\int_0^h \tau dx$, тим вище концентрація напружень σ_x при постійному σ . Таким чи-

ном, зі збільшенням глибини надрізу h зростають $\sigma_{x\max}$ і теоретичний коефіцієнт концентрації напружень:

$$\alpha = \sigma_{x\max} / \sigma . \quad (3.1)$$

Із зменшенням γ при постійному h інтеграл $\int_0^h \tau dx$ залишається постійним, але змінюється характер епюри τ (рис.3.1, г) – пунктирна лінія.

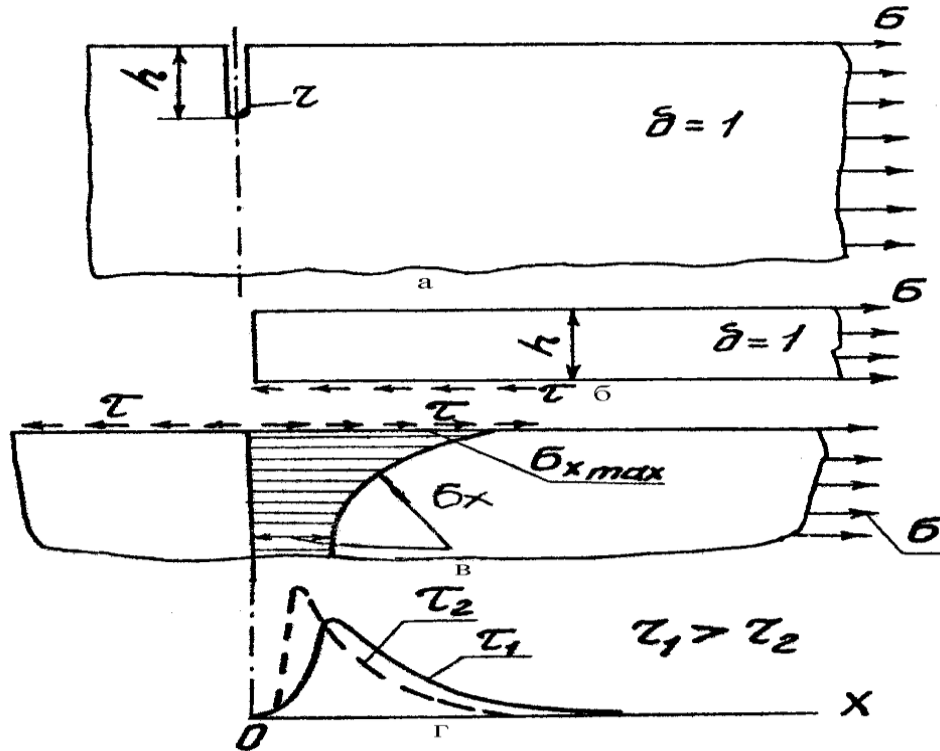


Рисунок 3.1 – Розподіл напружень у пластині, яка має надріз

Це викликає зростання $\sigma_{x \max}$ з наступної причини. З теорії пружності відомо, що дотичні сили P , які прикладені на краю пластини (рис.3.2, а), викликають різні напруження σ_0 у точці 0 у залежності від відстані x , на якій сили розташовані від точки 0 і визначаються за формулою $\sigma_0 = 4P/\pi x$. Чим менше x , тим значніше напруження σ_0 . Дотичні напруження τ_2 сили P розташовані ближче до точки 0 (рис 3.1,г), тому вони і викликають більш високі напруження $\sigma_{x \max}$, тобто, із зменшенням γ концентрація напружень зростає.

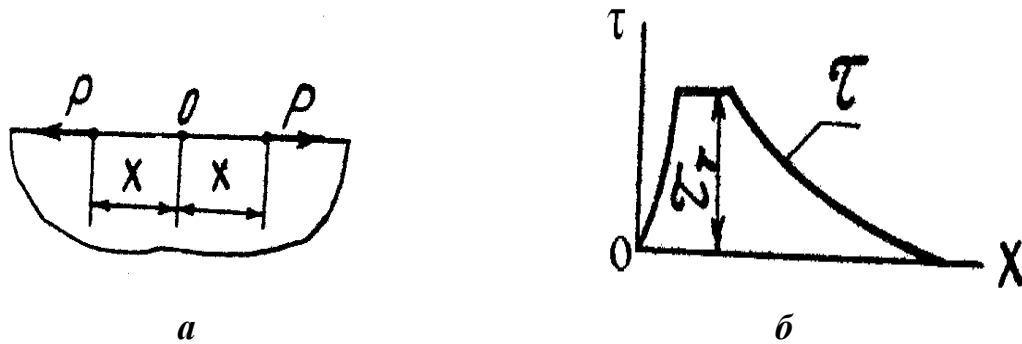


Рисунок 3.2 – Дотичні сили P на краю пластини (а) і епюра дотичних напружень τ при наявності текучості металу в зоні (б)

При досягненні дотичними напруженнями межі текучості $\tau = \tau_T$ змінюється форма епюри τ (рис.3.2, б), змінюється і епюра σ_x . При ударному прикладанні навантаження σ_T зростає, також зростає й концентрація напружень σ_x .

Із зниженням температури вплив концентрації напружень на настання руйнування зростає з наступної причини. Із зниженням температури величина $\sigma_{руйн}$ залишається майже незмінною, а σ_T зростає. При тому ж самому навантаженні епюра τ змінює свій вид (рис. 3.3). При зростанні σ_T зростає $\sigma_{хmax}$ в точці 0 при постійному навантаженні, що приводить до передчасного руйнування.

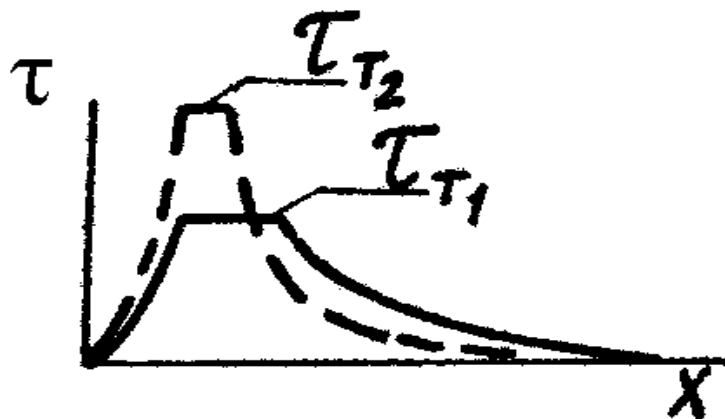


Рисунок 3.3 – Розподіл дотичних напружень τ при різних температурах і межах текучості металу

У високоміцних матеріалів величина σ_T зближається з $\sigma_{руйн}$, що означає: у дна надрізу початок пластичної деформації в них поєднується з

утворенням $\sigma_{\text{хmax}}$ більш близьких до $\sigma_{\text{руйн}}$, ніж у сталей звичайної міцності; тобто, руйнування у високоміцних сталей при наявності концентраторів можуть виникнути при невисоких середніх напруженнях.

3.2 Концентрація напружень і пластичні деформації металу при руйнуванні [9]

Визначення напружено-деформованого стану має двояке значення: по-перше, знання розподілу напружень і деформацій у межах пружних деформацій дозволяє судити про ступені напруженості металу в різних точках деталі; по-друге, без вичерпного опису напружень і деформацій при високих їх рівнях, неможливо визначити багато механічних характеристик металів після проведення випробувань зразків, безпосередньо пов'язаних із критеріями міцності й пластичності. На рис.3.4 наведений розподіл напружень і розміри зон пластичних деформацій у полосі з надрізами.

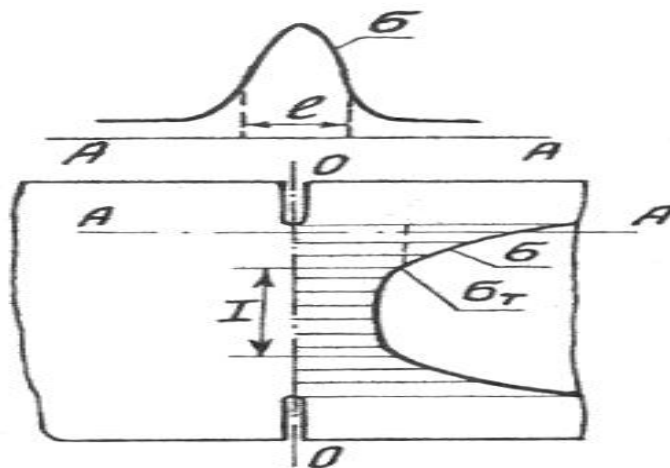


Рисунок 3.4 – Розподіл напружень і розмір зони пластичних деформацій у полосі з надрізами

Одним із проявів концентрації напружень є зменшення пластичних деформацій металу перед руйнуванням. Вимір пластичних деформацій на полосі з надрізом (рис.3.4) показує, що розподіл деформацій дуже нерівномірний, як по поперечному перерізі (О-О), так і в напрямку дії навантаження (у перерезі А-А). При високому ступені концентрації напруження до моменту настання руйнування пластична деформація може виникнути лише поблизу концентраторів, у той час як зона І буде залишатися на пружній стадії деформування.

За перерізом А-А пластичною деформацією охоплена порівняно невелика зона розміром ℓ , тому концентратори напружень є однією з основних причин появи крихкості в металах, які можуть руйнуватися після незначної пластичної деформації. Зменшення об'єму зон протікання пластичної деформації означає зменшення роботи, яку потрібно затратити перед руйнуванням елемента. У експериментах для цієї мети виконують гострі надрізи на зразках.

Гранично жорсткі умови концентрації напружень спостерігаються при русі тріщини у металі. Експериментальне визначення пластичних деформацій поблизу площини руйнування вказує на різку нерівномірність їхнього розподілу. Ширина ℓ (рис.3.5) зони пластичних деформацій різна у різних металів і може становити від сотих до декількох десятих міліметра.

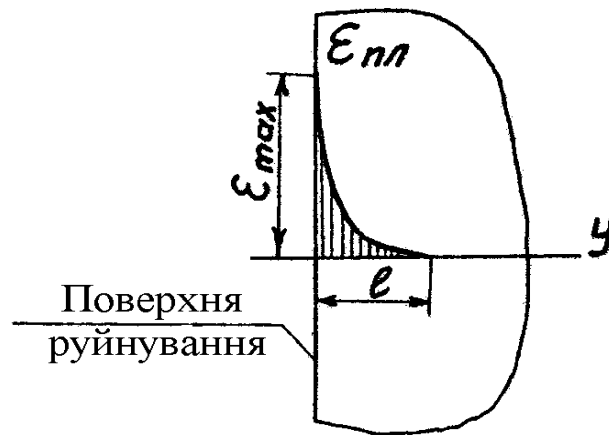


Рисунок 3.5 – Розподілення пластичних деформацій поблизу поверхні руйнування

Величина $\epsilon_{\max}$ також різна в залежності від матеріалу та температури випробування. Вона може змінюватися від 30...40% у межах руйнування до нуля. Пластичні деформації ще менші, коли при руйнуванні має місце плоска деформація, яка у напрямку товщини дорівнює нулю ($\epsilon_z = 0$). Пластини великої товщини, а також крихкі метали руйнуються в умовах плоскої деформації, що протікає при збереженні незмінності об'єму металу. Так як, при цьому стоншення металу за товщиною неможливе, то пластична деформація у вершині тріщини виникає переважно за рахунок зрушення металу у вкрай обмежених об'ємах.

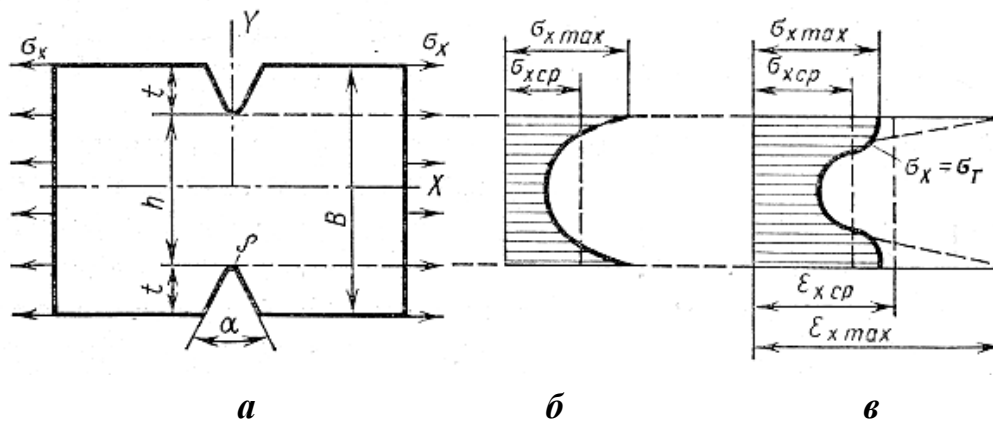
Пластична деформація супроводжується перетворенням механічної роботи в тепло, тобто з поглинанням енергії. Необхідність витратити енергію при руйнуванні й тим більшу, чим більша пластична деформація металу, є найважливішою особливістю процесу руйнування металу.

3.3 Критерії оцінки напружено-деформованого стану при концентрації напружень [9]

При визначенні механічних властивостей зварних з'єднань застосовуються стандартні зразки без гострих надрізів. У багатьох випадках необхідно оцінювати опірність металу руйнуванню на зразках з гострими надрізами. На концентрацію напружень впливають: форма елемента, його лінійні розміри (h , t , B), радіус концентратора ρ , кут між гранями концентратора α (рис.3.6,а) і вид прикладеного навантаження (розтягування, вигин, зрушення й т.д.).

Розглянемо тонку пластину, у якій за товщиною $\sigma_z = 0$. В ослабленому перерезі діють середні напруження (рис.3.6, б)

$$\sigma_{\text{хср}} = \sigma_x B/h.$$



а - загальний вид навантаженої пластини,

б - епюра напружень у пружній ділянці,

в - епюри деформацій і напружень при $\sigma_{\text{хmax}} > \sigma_T$

Рисунок 3.6 – Розподілення напружень і деформацій у пластині з надрізами

Ступінь концентрації напружень при $\rho \neq 0$ заведено оцінювати коефіцієнтом концентрації напружень

$$\alpha_\sigma = \sigma_{\text{хmax}}/\sigma_{\text{хср}}, \quad (3.2)$$

де $\sigma_{\text{хmax}}$ – максимальне напруження.

Якщо знехтувати впливом напружень σ_y в ослабленому перерізі, то в пружній області коефіцієнт концентрації напружень α_σ приблизно збіга-

ється з коефіцієнтом концентрації деформацій $\alpha_\varepsilon = \varepsilon_{\text{хmax}} / \varepsilon_{\text{хср}}$. Коефіцієнти концентрації α_σ і α_ε у пружній області не залежать від рівня прикладених напружень при статичному навантаженні.

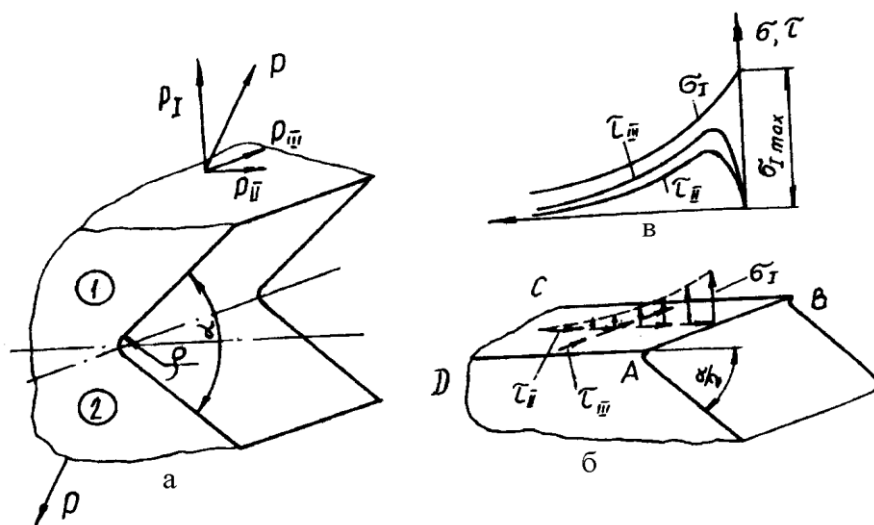
Якщо максимальне напруження досягає межі текучості σ_T , то поблизу концентраторів з'являються зони пластичних деформацій. Коефіцієнт концентрації напружень α_σ у міру зростання навантаження буде зменшуватися унаслідок відставання зросту $\sigma_{\text{хmax}}$ від $\sigma_{\text{хср}}$ (рис.3.6, в).

Якщо $h \gg t$, то зміна h при $t = \text{const}$ мало впливає на коефіцієнт концентрації напружень α_σ . Такі надрізи називаються дрібними. Коефіцієнт концентрації напружень у них залежить від зміни t . Чим більше t , тим вище коефіцієнт концентрації напружень, отже $\alpha_\sigma \approx \sqrt{t}$. (3.3)

Якщо $t \gg h$, то коефіцієнт концентрації напружень α_σ в основному залежить від зміни h і мало залежить від зміни t . Такі надрізи називаються глибокими. У них чим більше h , тим вище коефіцієнт концентрації напружень, тобто

$$\alpha_\sigma \approx \sqrt{h}. \quad (3.4)$$

Концентратори напружень, які характерні для зварних конструкцій [9], розрізняються між собою за наступними ознаками: кутом α між площинами концентратора, радіусом ρ у вершині концентратора, видом напруженого стану в площині ABCD, що проходить через бісектрису кута α (рис.3.7, а).



а – форма і схема прикладання сил;

б, в – характер розподілу напружень

Рисунок 3.7 – Концентратор напружень у зварному з'єднанні

Напруження на площині АВСД описується трьома складовими: нормальними напруженнями σ_1 (нормальний відрив), дотичними напруженнями – τ_2 (зрушення) і дотичними напруженнями τ_3 (антиплоске зрушення), які є результатом дії сили P (рис.3.7, б, в). Якщо $\rho \neq 0$, то оцінку напруженого стану ведуть за коефіцієнтом концентрації напружень α_σ або за коефіцієнтом концентрації деформацій α_ε :

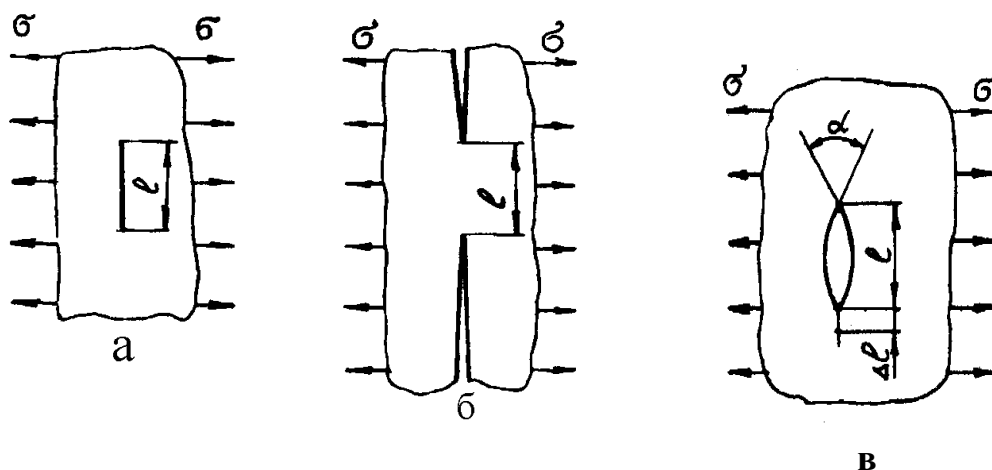
$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ср}}}; \quad \alpha_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\text{ср}}}. \quad (3.5)$$

У загальному випадку концентрація напружень може бути перемінною уздовж лінії АВ, що визначається характером прикладання сили P до частин тіла 1 і 2 (рис. 3.7) і жорсткістю самих тіл.

Чим менше радіус концентратора ρ і кут α , тим вище значення коефіцієнта концентрації напружень α_σ . При $\alpha = 0$, якщо грані паралельні, коефіцієнт концентрації напружень визначається виразом

$$\alpha_\sigma \approx \sqrt{t/\rho}, \text{ або } \alpha_\sigma \approx \sqrt{h/\rho}. \quad (3.6)$$

Розглянемо розтягнуті напруженням σ тонкі нескінченні пластини (плоский напружений стан), які мають вигляд (рис. 3.8, а, б, в) відповідно, у вигляді тріщини з $\alpha = 0$ (рис. 3.8, а), надрізів (рис. 3.8, б) і вирізу (рис.3.8, в).



а - тріщина з $\alpha = 0$;

б - розмір перерізу пластини, у якій розташована тріщина;

в - виріз із $\alpha \neq 0$

Рисунок 3.8 – Нескінченна пластинка з надрізами ($\rho = 0$)

При $\rho = 0$ розрахункове напруження стає рівним нескінченності і поняття коефіцієнта концентрації напружень утрачає зміст. У механіці руйнування при $\rho \rightarrow 0$ для оцінки напружено-деформованого стану використовують коефіцієнт інтенсивності напружень у вершині тріщини при пружних деформаціях (K) і поняття коефіцієнта інтенсивності вивільнення енергії деформації (G), який визначається за формулою $G = \pi \sigma^2 L / 2E$ і означає виділення енергії при підростанні тріщини в тілі на одиницю площі і дорівнює 1-й похідній від пружної енергії, накопиченої в тілі у випадку, коли зовнішні сили не виконують ніякої роботи, й виражається у джоулях на кв.метр. При цьому пружна енергія в тілі зменшується. Якщо зовнішні сили одночасно здійснюють роботу, то вони додають тілу додаткову енергію і повна енергія може збільшуватися. Виділена енергія залежить тільки від енергії пружної деформації тіла і величини підростання тріщини. Робота зовнішніх сил виступає як підведена до тіла енергія, а не як енергія, яка підводиться до тріщини й виділяється при її підростанні.

Коефіцієнт інтенсивності напружень K лінійно залежить від прикладених за контуром напружень або сил і пропорційний $\sqrt{\ell}$, де ℓ - довжина тріщини (рис.3.8, а), чи розмір небезпечного перерізу зразка (рис.3.8, б) або вирізу (рис.3.8, в) і дорівнює

$$K = \sqrt{\pi/2} \sigma \sqrt{\ell}, \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}; \quad (3.7)$$

де σ – середнє напруження в ослабленому або в неослабленому перерізі на деякій відстані від тріщини.

Між коефіцієнтами K і G існують залежності:

$$G = K^2/E \quad - \text{ для плоского напруженого стану}; \quad (3.8)$$

$$G_1 = \frac{(1-\mu^2)K^2}{E} \quad - \text{ для плоского деформованого стану} \quad (3.9)$$

Величини K і G використовуються для оцінки властивостей металу при наявності в них тріщини.

Чутливість металу до концентрації напружень у випадку концентраторів з надрізами може також оцінюватися величиною коефіцієнта концентрації α_T , при якому широкий зразок із щілиноподібним надрізом руйнується при напруженні, рівному межі текучості σ_T і розраховується за формулою Нойбера

$$\alpha_T = \sqrt{\alpha_\sigma} \alpha_\varepsilon ,$$

де α_σ і α_ε – коефіцієнти концентрації, відповідно, напружень і деформацій.

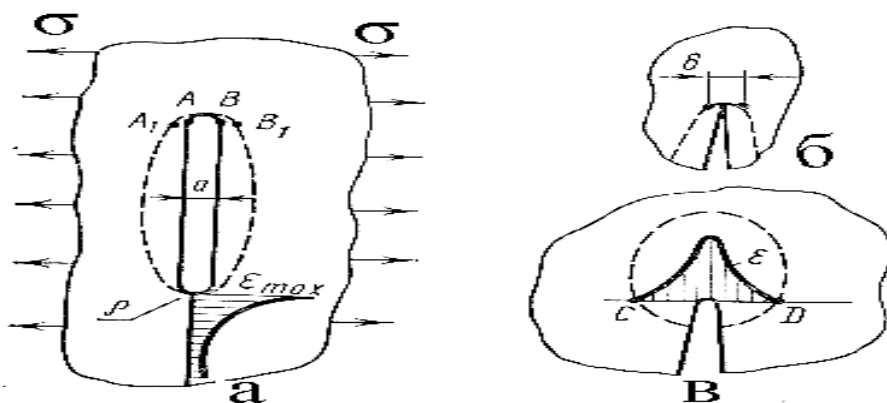
У момент настання руйнування в концентраторі досягаються дійсні руйнівні напруження $\sigma_{\text{руйн}}$ і руйнуючі деформації $\varepsilon_{\text{руйн}}$, які можуть бути визначені при одновісьовому розтягуванні гладкого зразка. Середні напруження і деформації, відповідно, дорівнюють σ_T і $\varepsilon_T = \sigma_T/E$; тоді

$\alpha_\varepsilon = \varepsilon_{\text{руйн}}/\varepsilon_T$ і $\alpha_\sigma = \sigma_{\text{руйн}}/\sigma_T$. Підставляючи ці значення у формулу Нойбера, одержимо:

$$\alpha_T = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{руйн}} \varepsilon_{\text{руйн}} E}{\sigma_T^2}}. \quad (3.10)$$

Як характеристику напружено-деформованого стану використовують також поняття розкриття вершини концентратора δ . Спочатку воно застосовувалося до концентраторів з $\rho \neq 0$ і означало збільшення "а" біля дна вирізу (рис.3.9, а) і яке визначалося як різниця A_1B_1 після навантаження і AB до навантаження, тобто

$$\delta = A_1B_1 - AB. \quad (3.11)$$



a - зміна відстані між точками A і B;

б - розкриття кінця тріщини;

в - інтеграл пружнопластичних деформацій

Рисунок 3.9 – Різні випадки визначення розкриття вершини тріщини

Потім це поняття було перенесено на тріщини (рис.3.9,б), але при цьому досить складно точно визначити величину розкриття тріщини. У по-

точний час за критерій δ використовується інтеграл пружнопластичних деформацій $\mathcal{E}$ на довжині CD (рис.3.9, в).

У зварних з'єднаннях (стикові й таврові з'єднання, несплавлення, перехід від шва до основного металу) існує безперервний спектр зміни ρ від нуля до часток міліметра і більш у залежності від поверхневого натягу рідкого металу та умов його деформування. При $\rho < 0,5$ мм умовна база переміщення може бути взята рівною 1 мм (рис.3.10), а замість реальної межі тіла, показаною суцільною лінією, можна приймати межу, яка показана штриховою лінією (рис.3.10, б) $\square$.

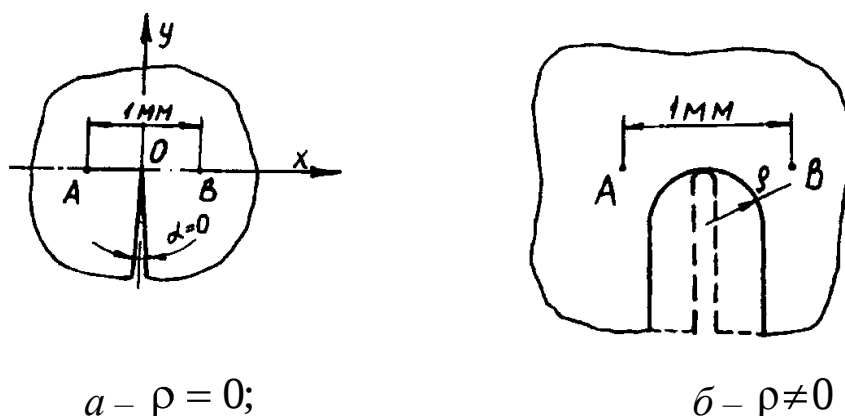


Рисунок 3.10 – Схема розташування бази 1 мм у вістря надрізу при $\alpha = 0$ й різних значеннях ρ

До деформаційних критеріїв відноситься також критерій динамічного розкриття тріщини Δ_{cd} при її швидкому поширенні в умовах плоского напруженого стану, який застосовується відносно листових матеріалів. У них зона пластичної деформації при руйнуванні значно більше товщини металу.

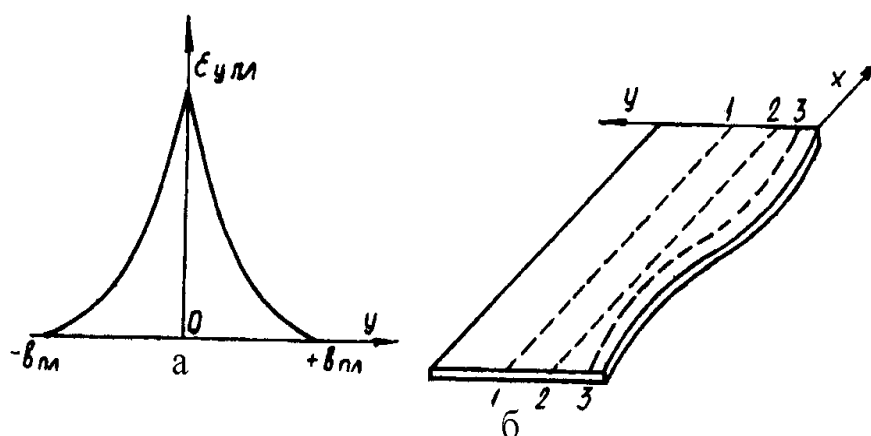


Рисунок 3.11 – Схема подовжніх (а) і поперечних пластичних деформацій (б) біля краю розриву

По суті деформаційний критерій розкриття тріщини являє інтеграл поперечних пластичних деформацій $\varepsilon_{\text{упл}}$, які виникають у процесі поширення тріщини ліворуч і праворуч від неї (рис. 3.11).

$$\Delta cd = \int_{-b_{\text{пл}}}^{+b_{\text{пл}}} \varepsilon_{\text{упл}} d_y,$$

де $2b_{\text{пл}}$ – розмір ширини зони пластичних деформацій.

Характеристикою деформованого стану металу біля надрізу є коефіцієнт інтенсивності деформацій V ($\text{м}^{1/2}$), який у простому випадку концентратора з паралельними гранями $\alpha = 0$ обчислюється за формулою

$$V = \varepsilon_{\text{max}} \sqrt{\rho} = \varepsilon_{\text{ср}} \alpha_{\varepsilon} \sqrt{\rho}. \quad (3.12)$$

Комплекс $\alpha_{\varepsilon} \sqrt{\rho}$ слабо залежить від ρ , тому що у випадку паралельних граней надрізу коефіцієнт концентрації $\alpha_{\sigma} \approx A/\sqrt{\rho}$. Значення величини A пропорційно $\sqrt{\ell}$. При $\rho = 0$ (тріщина) значення величини V з точністю до постійного коефіцієнта співпадає з коефіцієнтом інтенсивності напружень K :

$$V = 2K/(\sqrt{\pi} E). \quad (3.13)$$

При $\alpha \neq 0$ розмірності V і K залежать від кута α . Таким чином, для чисельного визначення V за формулою необхідно знати геометричні розміри тіла і середню деформацію $\varepsilon_{\text{ср}}$.

4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПІРНОСТІ МЕТАЛУ РУЙНУВАННЮ У ПРИСУТНОСТІ КОНЦЕНТРАТОРІВ

4.1 Оцінка властивостей металу й елементів конструкції на стадії утворення тріщин

Найпоширенішою характеристикою оцінки міцності металу, зварного з'єднання або деталі в присутності концентратора є середнє руйнівне напруження $\sigma_{\text{ср,р}}$, обумовлене при розтягуванні або зрізі відношенням руйнівній сили $P_{\text{р}}$ до площі ослабленого перетину або руйнівного моменту $M_{\text{р}}$, до моменту опору W при вигині. Проте, оцінка властивостей тільки по середньому руйнівному напруженні може не виявити негативний вплив концентратора поки він не перевищить деякого значення.

У деяких випадках необхідно визначити їхню опірність руйнуванню, тобто, до утворення тріщин. Ця опірність оцінюється трьома показниками:

- 1) силою P_p або моментом при утворенні тріщини M_p ;
- 2) пружнопластичною деформацією металу в перетині, що досягає до моменту утворення тріщини $\epsilon_{cp,p}$;
- 3) роботою, що здійснюється на стадії пружнопластичної деформації до появи тріщин A_3 .

Оцінка несучої здатності елемента або зразка за середнім руйнівним напруженням $\sigma_{cp,p}$ дуже поширена:

$$\sigma_{cp,p} = \frac{P_p}{F}; \quad \sigma_{cp,p} = M_p / W . \quad (4.1)$$

З діаграми залежності σ_{cp} від середньої деформації $\sigma_{cp} = f(\epsilon_{cp})$ видно (рис. 4.1), що перехід від дуже пластичних форм руйнування (т.В) до малопластичних (т.А) супроводжується незначним зменшенням P_p , але великою зміною середньої руйнівної деформації $\epsilon_{cp,p}$. Зменшення $\epsilon_{cp,p}$ свідчить про наближення до крихких форм руйнування, які дуже небезпечні у відношенні лавинних подовжніх руйнувань. Тому оцінка властивостей металу тільки за $\sigma_{cp,p}$ недостатня. Необхідна додаткова оцінка властивостей конструкційних елементів за середній пружнопластичній деформації перетину, яка досягається до моменту появи тріщини.

Точне визначення пружнопластичних деформацій розрахунковим шляхом утруднено через недостатній розвиток практичних методів. Тому використовуються експериментальні наближені методи, які дозволяють давати оцінку ступеня небезпеки тих або інших типів концентраторів у конкретних зварних з'єднаннях.

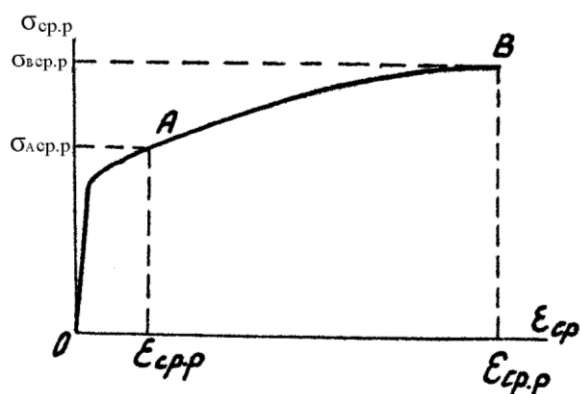


Рисунок 4.1 – Діаграма залежності σ_{cp} від середньої деформації ϵ_{cp}

При наявності дефектів, які незначно зменшують переріз робочого елемента розходження між порівнюваними варіантами за $\sigma_{\text{ср.р}}$ може виявитися невеликим, тому одним з основних критеріїв оцінки має бути деформаційний критерій у виді середньої руйнівної деформації $\varepsilon_{\text{ср.р}}$ (рис. 4.2, а). При ослабленні перетині в межах частки або навіть відсотка, місце визначення (розрахунку) $\varepsilon_{\text{ср}}$ несуттєво; воно може бути обране, як в ослабленому перетині, так і за його межами.

При розрахунках і оцінках за ослабленим перетином визначати середню деформацію потрібно в цьому перетині, але подалі від концентратора на базі Б (рис.4.2,б). Незважаючи на нерівномірний розподіл деформації в межах ослабленого перетину, рівень $\varepsilon_{\text{Б}}$ близький до $\varepsilon_{\text{ср}}$ (рис.4.2, а). На діаграмі Р- Δ (рис.4.2,в) є лінійна (пружна) ділянка ОА. Промінь ОВ дозволяє з повного переміщення Δ виділити пластичну складову, а також $\Delta_{\text{пл.р}}$ у момент руйнування, який умовно збігається з максимумом навантаження $\bar{F}$.

Випробування стикових з'єднань на вигин (рис.4.2, г), які мають значний непровар, дозволяють визначити критичний кут $Q_{\text{р}}$, при якому настає руйнування шва. Від нього можна перейти до $\varepsilon_{\text{ср.р}}$, через $\varepsilon_{\text{Бр}}$, як зазначено на рис. 4.2, а. Вимірювана база Б повинна розташовуватися в середній частині ширини зразка В (рис. 4.2, б). Для забезпечення умов плоскої деформації необхідно, щоб В було не менш $2,5h$. Розмір бази Б не повинний перевищувати $0,25...0,3h$. Коли розрахунковий перетин шва дуже поступається по міцності сусіднім елементам, то доцільно користуватися інтегральним деформаційним критерієм – переміщенням Δ частин зразка або деталі відносно один одного (наприклад, у кутових швах і напускних з'єднань руйнівне переміщення $\Delta_{\text{р}}$ є однією з найважливіших механічних характеристик) $\bar{F}$.

Так як Δ містить у собі пружну деформацію не тільки шва, але і прилягаючого основного металу, стає доцільним використовувати для оцінок тільки пластичну складову деформації $\Delta_{\text{пл}}$, що зосереджена у шві та зоні основного металу і яка працює спільно зі швом (рис.4.2, в).

Приблизно $\varepsilon_{\text{ср.р}}$ можна зв'язати з ε_{max} у межах пружності через коефіцієнт концентрації α :

$$\varepsilon_{\text{max}} = \alpha \varepsilon_{\text{ср.р}} \quad (4.2)$$

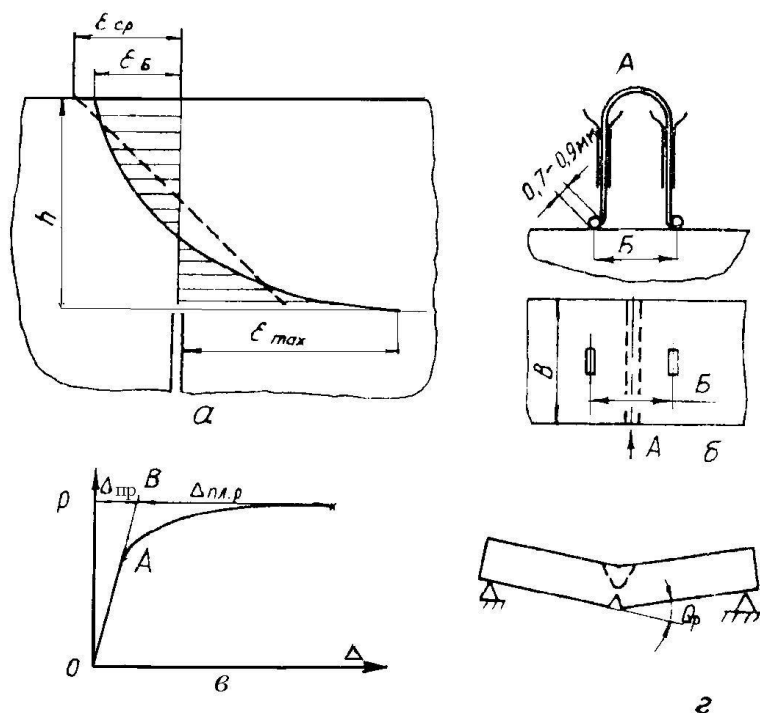


Рисунок 4.2 – Схема виміру $\varepsilon_{\text{б}}$, визначення $\varepsilon_{\text{ср}}$ (а, б), розділ переміщення Δ на пружну й пластичну складову (в) і кути повороту θ_p (г)

Помноживши ліву й праву частини рівності на $\sqrt{\frac{r}{r_0}}$, де r - радіус концентратора; r_0 - радіус, що дорівнює одиниці, одержимо:

$$\varepsilon_{\text{max}} \sqrt{\frac{r}{r_0}} = \alpha \sqrt{\frac{r}{r_0}} \cdot \varepsilon_{\text{ср}} \quad (4.3)$$

Вираження $\alpha \sqrt{\frac{r}{r_0}}$ для багатьох типів концентраторів мало залежить

від r , тому що при зміні r у кілька разів $\alpha \sqrt{\frac{r}{r_0}}$ зміниться тільки на 10...15%.

Це дозволяє давати комплексну оцінку концентратора, визначаючи наведену деформацію V_p у момент настання руйнування:

$$V_p = \alpha \sqrt{\frac{r}{r_0}} \cdot \varepsilon_{\text{ср.р}} = \varepsilon_{\text{max}} \sqrt{\frac{r}{r_0}} \quad (4.4)$$

Для цього необхідно експериментально визначити $\varepsilon_{\text{ср.р}}$ і скористатися коефіцієнтом концентрації напружень у пружній області α , попередньо задавшись приблизною величиною Γ . За експериментально знайденою величиною $V_{\text{експ}}$ можна для однотипного концентратора, що перебуває в складі іншого за розмірами зварного з'єднання, обчислити:

$$\varepsilon_{\text{ср.р}} = \frac{V_{\text{експ}}}{\alpha \sqrt{\frac{r}{r_0}}} \quad (4.5)$$

і знайти запас пластичності:

$$n_{\varepsilon} = \varepsilon_{\text{ср.р}} / \varepsilon_{\text{ср.н}}, \quad (4.6)$$

де $\varepsilon_{\text{ср.н}}$ – середня деформація від експлуатаційного навантаження.

Коефіцієнт V_r відображає тільки властивості металу й геометричні особливості зони кінця дефекту. Значення V_r можуть використовуватися як характеристики опірності зони конструкції зварних з'єднань руйнуванню, які характеризують вплив термічного циклу зварювання й радіусів переходу до основного металу і можуть застосовуватися для вибору технології, режимів зварювання й термообробки.

При збільшенні розміру непровару, або погіршенні властивостей металу $\sigma_{\text{ср.р}}$ буде зменшуватися, тому поруч із визначенням R_r доцільно реєструвати пластичність металу зварного з'єднання Δ_r шляхом фіксування зміни відстані між точками А і В(рис.4.3). Крива 1 (рис.4.3, в) указує на більшу пластичність з'єднання, а крива 2 – на малу пластичність. При збільшенні товщини металу або непровару при малій пластичності $\sigma_{\text{ср.р}}$ можуть помітно падати, приймаючи значення, позначені хрестиками.

Для виключення впливу пружності ділянки АВ можна з повного переміщення Δ_r відняти пружну його складову $\Delta_{\text{пр.р}}$ і одержати:

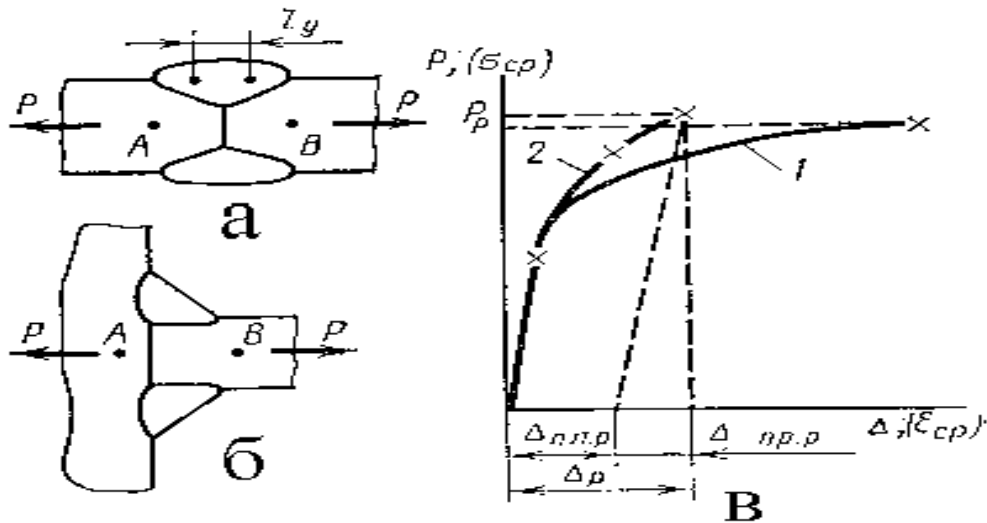
$$\Delta_{\text{пл.р}} = \Delta_r - \Delta_{\text{пр.р}},$$

що характеризує середню руйнуючу пластичну деформацію $\varepsilon_{\text{ср.р}}$ в ослабленому концентратором перетині.

$$\varepsilon_{\text{ср.р}} = \Delta_{\text{пл.р}} / \ell_{\text{ум}}, \quad (4.7)$$

де $\ell_{\text{ум}}$ – умовна довжина, на якій розподілені деформації ε , що

утворюють переміщення $\Delta_{пл.р}$. При $\Delta_{пл.р}$ набагато більшим $\Delta_{пр.р}$ можна користуватися величиною Δ_p .



а, б – зразки; в – діаграма

Рисунок 4.3 – Вид зразків і діаграми при випробуванні зварних з'єднань із непроваром [2]

Оцінку за пластичністю $\mathcal{E}_{ср.р}$ застосовують і при випробуваннях на вигин стикових і напускних зварних з'єднань (рис.4.4, а,б). Зразки із цих з'єднань, що мають ослаблення для зосередження деформацій поблизу лінії сплавлення, установлюються в пристосування (рис.4.4, в) для консольного вигину зразка і навантажуються до появи тріщини за лінією сплавлення.

При випробуваннях фіксується кут θ_p – кут повороту в радіанах (рис.4.4, г), при якому утворилася тріщина й відбулося руйнування. Приблизно визначається середня руйнівна пластична деформація $\mathcal{E}_{ср.р}$ в ослабленому концентраторі перетині.

У зразках з непроваром з низьковуглецевих і низьколегованих сталей (рис.4.4, в) за знайденим значенням θ_p визначають $\mathcal{E}_{ср.р}$ за формулою

$$\mathcal{E}_{ср.р} \approx 0,8\theta_p, \quad (4.8)$$

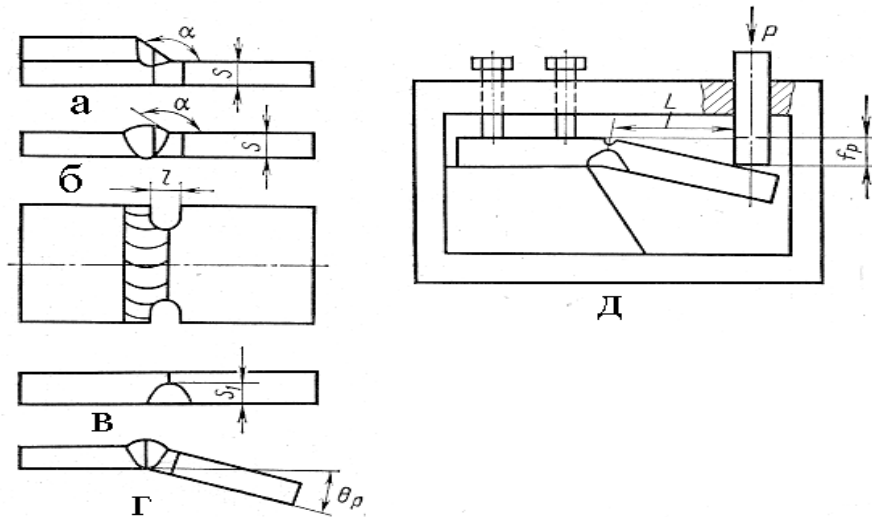
а також обчислюють критичний коефіцієнт інтенсивності деформацій

$$V_p = \mathcal{E}_{\max} \sqrt{\frac{r}{r_0}}.$$

$$\text{У зразках з повним проваром} \quad \varepsilon_{\text{ср.р.}} = \frac{\theta_p S}{2\ell}, \quad (4.9)$$

де S – товщина металу; ℓ – ширина ослаблення зразка.

$$\text{При } \ell = S \text{ середня руйнуюча деформація} \quad \varepsilon_{\text{ср.р.}} = \frac{\theta_p}{2}. \quad (4.10)$$



- а – зразок напускного з'єднання;*
- б - зразок стикового з'єднання з повним проваром;*
- в - зразок стикового з'єднання з неповаром;*
- г - зразок після випробувань;*
- д - пристрій для випробування*

Рисунок 4.4 – Визначення $\varepsilon_{\text{ср.р.}}$ під час випробування зварних з'єднань на вигин [2].

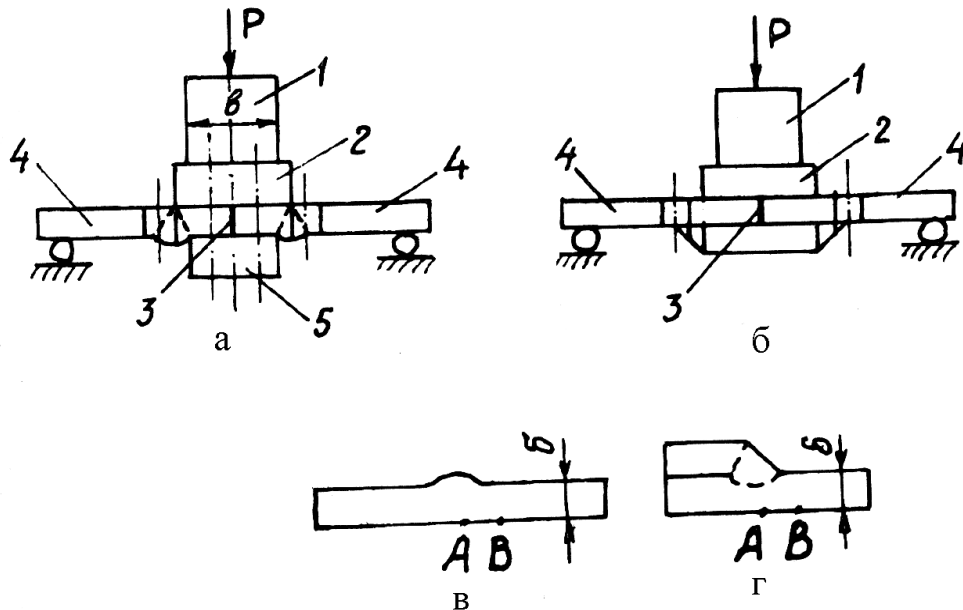
Показник пластичності $\varepsilon_{\text{ср.р.}}$ характеризує не тільки пластичні властивості металу, але також вплив різних параметрів зварного з'єднання (радіуса концентратора, кута переходу (α) від шва до основного металу, товщини металу або величини неповару S_1), а також і механічні неоднорідності, викликані термічним і деформаційним циклом зварювання.

При ударних випробуваннях для визначення моменту утворення тріщини застосовується метод навантаження двох зразків силою P (рис.4.5).

По вигину зразка, що не зруйнувався, визначають $\varepsilon_{\text{ср.р.}}$.

Два однакових зразка 4 (рис.4.5,а) повинні бути або стягнуті накладками 2 і 5, або зварені по стику 3. Пуансон 1 випробувальної машини пови-

нен бути плоским і достатньо широким (розмір b), щоб забезпечити поступальний рух накладці 2 без її повороту. Тоді кути вигину θ_p у лівого і правого зразків будуть однаковими майже до появи тріщини у одного із зразків або у обох зразу. Ширина накладки 2 повинна відповідати положенню кромок виточення у зразків. Випробування напускних з'єднань може бути виконане також за схемою на рис.4.5,а або за схемою на рис.4.5,б. В останньому варіанті зразки або попередньо зварені по стику 3, або спеціально виготовлені як єдине ціле.



*а – зі стиковим швом; б – з кутовим швом;
в, г – розташування бази на зразках*

Рисунок 4.5 – Схема випробувань зварних зразків на вигин

Крім них використовуються й енергетичні характеристики: робота зародження тріщини A_3 (Дж) і енергія, яка вивільняється при зародженні тріщини G_3 (Дж/м²) від концентратора і тісно пов'язана з величиною G_c . Їхня відмінність: G_c відноситься до стадії початку руху і руйнування від наявних тріщин, а G_3 – до моменту появи тріщини від якого-небудь концентратора.

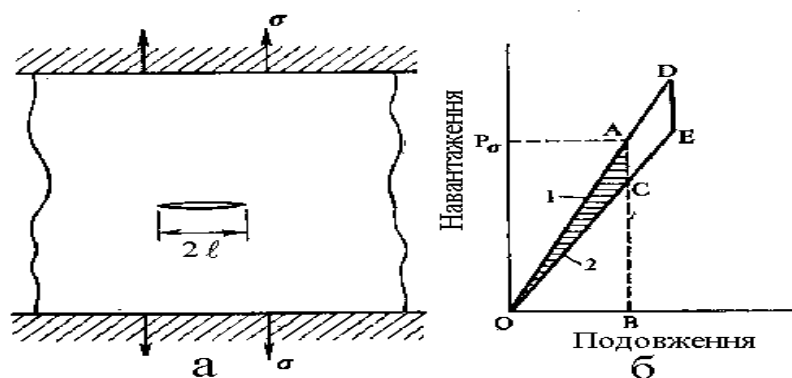
4.2 Критична рівновага тріщини

Розглянемо нескінченну пластину одиничної товщини із центральною поперечною тріщиною 2ℓ , на яку діють напруження σ (рис.4.6). Края пла-

стини нерухомі. Необхідно визначити величину напруження, при якому тріщина починає рухатися, якщо для утворення нової поверхні потрібна енергія W .

Запасена в пластині пружна енергія представлена площею трикутника ОАВ (рис.4.6,б). Якщо довжина тріщини збільшиться на величину $\Delta \ell$, то жорсткість пластини зменшиться (лінія ОС), тобто навантаження декілька зменшиться, тому що края пластини нерухомі.

Отже, пружна енергія, що запасена в пластині, зменшиться до величини, рівної площі трикутника ОСВ; тобто, збільшення довжини тріщини з ℓ до $\ell + \Delta \ell$ вивільнить пружну енергію, рівну площі трикутника ОАС.



а – пластина із тріщиною і з нерухомими краями;

*б – енергія пружних деформацій пластини із тріщиною довжиною ℓ (1)
і $\ell + \Delta \ell$ (2)*

Рисунок 4.6 – Розтягнута пластина із тріщиною довжиною 2ℓ

Якщо пластина навантажується до більш високого напруження, то при збільшенні довжини тріщини на величину $\Delta \ell$ звільниться більша енергія. Трикутник ОДЕ являє собою енергію, що виділяється при поширенні тріщини.

Для того, щоб тріщина змогла просунутися на $\Delta \ell$ (рис.4.7), необхідно зруйнувати міжатомні зв'язки на довжині $\Delta \ell$, для чого необхідно затратити певну роботу A . Напружений метал в одиниці об'єму при одновісьовому розтягуванні напруженнями σ містить потенційну енергію

$$U = \frac{\sigma^2}{2E} \cdot \quad (4.11)$$

На рисунку 4.7 наведена графічна залежність критичного напруження від критичної довжини тріщини $\sigma_{кр} = f(\ell_{кр})$.

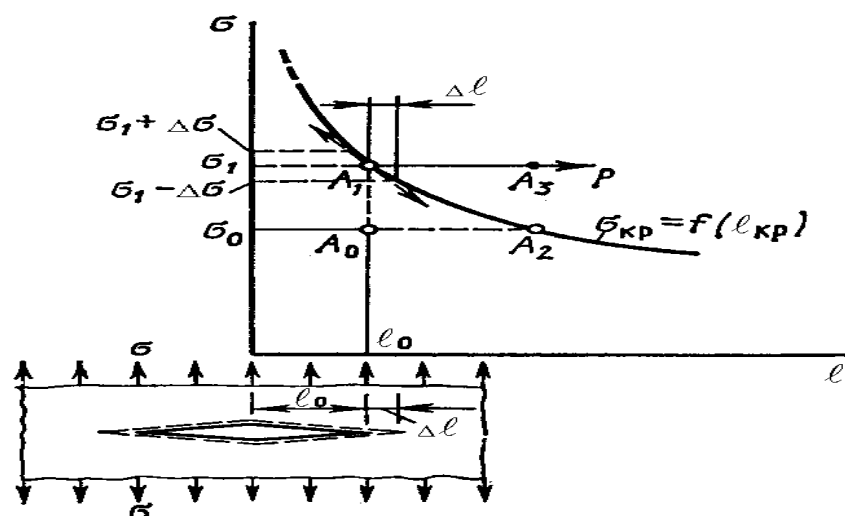


Рисунок 4.7 – Крива критичної рівноваги тріщини

У точці A_0 , яка лежить нижче кривій, діють напруження σ_0 . Тоді будь-які випадкові зміни в напруженнях $\sigma + \Delta\sigma$, або в довжині тріщини $\ell + \Delta\ell$ не викличуть зріст тріщини, тому що не буде виконуватися енергетична умова $G = W$ і виділеної енергії G буде недостатньо, щоб компенсувати витрати роботи на руйнування.

При зростанні напруження до σ_1 точка A_1 виявиться на кривій $\sigma_{кр} = f(\ell_{кр})$. Тут теоретично можливий повільний зріст тріщини з рухом точки A_1 униз кривою так, щоб збільшенню довжини $\Delta\ell$ точно відповідало зниження напружень $\sigma - \Delta\sigma$ і виконувалася б енергетична умова $dG + dW = 0$, а тріщина розвивалася б монотонно. Але ця рівновага нестійка. Звичайно в цих умовах навантаження й напруження σ_1 залишаються на постійному рівні. Точка A_1 рухається горизонтально у напрямку точки A_3 , енергія dG , яка виділяється, перевершує затрачувану роботу dW й виникає процес руйнування. Збільшення напружень $\sigma_1 + \Delta\sigma$ вимагає навіть "закриття" тріщини на довжину $\Delta\ell$, щоб точка оставалась на кривій і виконувалася

ся б енергетична рівновага. Але, тому що це неможливо, то виникає лавиноподібне поширення тріщини. Аналогічна ситуація виникає, якщо за рахунок підростання тріщини система переходить із точки A_0 у точку A_2 при $\sigma_0 = \text{const}$. Таким чином, дана крива визначає момент виникнення нестійкості в рівновазі тріщини, коли будь-які випадкові зміни напруження або довжини тріщини викличуть її зріст і називається кривою А.Гріффітса. Критична рівновага тріщини визначається критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень, тому що він знаменує втрату стійкості рівноваги системи.

4.3 Енергетична умова А. Гріффітса

Практика експлуатації металоконструкцій свідчить, що окремі їхні елементи з часом можуть руйнуватися внаслідок концентрації напружень, дефектів технології обробки та складання, впливу середовища, що приводить до виникнення та поступового розвитку тріщини. Іноді деталь може використовуватися майже протягом всього часу експлуатації при наявності тріщини. Отже, практично важливо не стільки наявність тріщини, як швидкість її поширення в тих чи інших умовах. У зв'язку з цим одною з основних задач механіки руйнування є вивчення міцності тіл з тріщинами з урахуванням геометрії тріщин та впливу на розвиток тріщини різних умов експлуатації.

Розрізняють три найпростіші типи розвитку тріщин з погляду зміщення їхніх берегів один від одного відповідно до дії різних зовнішніх навантажень (рис. 4.8). При деформації розтягування (схема 1) виникає тріщина відриву, коли її поверхні зміщуються у напрямках, перпендикулярних до поверхні тріщини; при деформації поперечного зсуву (схема 2) поверхні берегів тріщини зміщуються поперек її передньої кромки; при навантаженні за схемою 3 утворюються тріщини поздовжнього зсуву, при якому точки поверхні тріщини зміщуються вздовж передньої кромки.

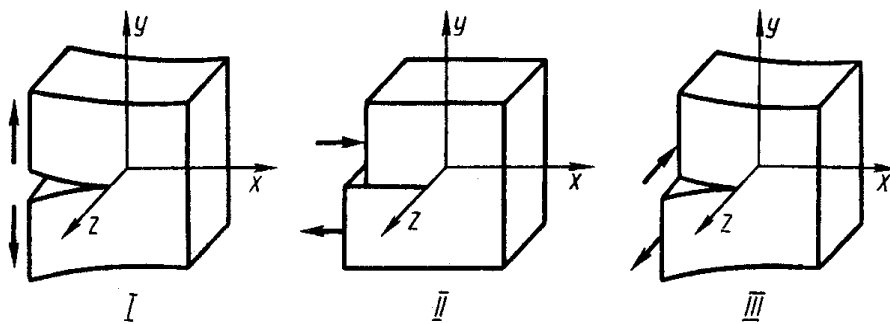


Рисунок 4.8 – Типи розвитку тріщин відповідно до дії різних зовнішніх навантажень

А.Гріффітс розглянув умови розвитку одиначної тріщини в пластині при її розтягуванні та крихкому руйнуванні (схема 1), пов'язаному з виникненням у матеріалі тріщин, спричинених дефектами в структурі матеріалу, станом поверхні деталі внаслідок обробки чи корозії, дією повторно-змінних навантажень. Тріщини, що виникли, спочатку розвиваються в часі повільно, а потім – швидко. Розвиток тріщин з часом може відбуватись і при постійному навантаженні.

З теорії тріщин виходить, що для розширення тріщини треба затратити певну роботу на подолання сил взаємодії сусідніх шарів матеріалу. Густина поверхневої енергії W – це робота, яка потрібна для утворення одиниці нової поверхні, визначається експериментально і для різних матеріалів буде різною і вважається константою матеріалу. Тіло передбачається ідеально крихким, тобто енергія витрачається тільки на утворення нової поверхні.

Згідно із законом збереження енергії А.Гріффітс визначив, що при розтягуванні нескінченної пластини довжиною 2ℓ тріщина починає поширюватися після того, коли при варіації її довжини напруження σ досягло критичного рівня, при якому дотримується рівність приросту роботи, що поглинається на руйнування металу й приросту енергії пружних деформацій пластини, що звільняється при підростанні тріщини (енергетична умова для ідеалізованої схеми руйнування). Тобто $dG + dW = 0$.

Якщо в суцільній розтягнутій пластині одиначної товщини утворити тріщину довжиною 2ℓ (рис.4.9), то потенціальна енергія деформації пластини зменшиться на

$$U = \frac{\pi \ell^2 \sigma^2}{E}, \quad (4.12)$$

що показує різницю потенціальної енергії деформації пластини без тріщини і з тріщиною у вигляді витягнутого еліпса.

$$U_{\text{пов}} = 4W\ell. \quad (4.13)$$

де $U_{\text{пов}}$ – енергія, яка затрачується на руйнування металу (поширення тріщини).

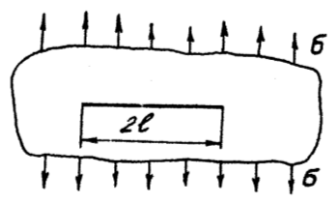


Рисунок 4.9 – Розтягнута пластина із тріщиною довжиною 2ℓ

Тоді сумарна зміна енергії складе :

$$U_{\Sigma} = -\frac{\pi \ell^2 \sigma^2}{E} + 4W\ell . \quad (4.14)$$

Якщо енергії звільняється більше, ніж поглинається, то тріщина самочинно починає рухатися без збільшення напруження. Це відповідає моменту рівності збільшень енергії, що вивільняється й затраченої, тобто:

$$\frac{\partial U_{\Sigma}}{\partial \ell} = 0 .$$

Диференціюючи рівняння (4.14) за ℓ , одержимо:

$$-\frac{2\pi \cdot \ell \sigma^2}{E} + 4W = 0 \quad \text{або} \quad (4.15)$$

$$2W - \frac{\pi \cdot \ell \sigma^2}{E} = 0 .$$

Приріст поверхневої енергії dW – величина додатна: вона характеризує збільшення внутрішньої енергії тіла, тоді як приріст потенціальної енергії деформації dG – від’ємна, тому що частина енергії виділяється тілом.

Звідки: критичне напруження для плоского напруженого стану:

$$\sigma_{кр} = \sqrt{\frac{2WE}{\pi \ell_{кр}}} ; \quad (4.16)$$

критична довжина тріщини :

$$\ell_{кр} = \frac{2WE}{\pi \sigma_{кр}^2} ; \quad (4.17)$$

критична енергія:

$$W = \frac{\pi \sigma_{кр}^2 \ell_{кр}}{2E} . \quad (4.18)$$

Таким чином, досить зареєструвати значення напруження в момент початку руху тріщини, щоб обчислити за формулою характеристику металу W .

Характер умови рівноваги, що поглинається і енергії, що вивільняється, визначається другою похідною:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \ell^2} = -\frac{\pi \sigma^2}{E}.$$

Так як це вираження негативне, то стан рівноваги, описуваний рівнянням (4.14) стає нестабільним і тому тріщина постійно зростає.

Суть теореми – максимальне руйнівне напруження має місце не при виникненні тріщини, а після досягнення нею деякого критичного розміру. Існують безпечні тріщини, які однак, можуть перейти в небезпечні за рахунок крихкості матеріалу, зниження температури, старіння матеріалу, динамічної дії навантаження.

Досліди показують, що пластична деформація розвивається поблизу вершини тріщини у порівняно тонкому шарі, який оточує її, залежить від багатьох факторів і може складати від декількох десятків мікронів до десятих часток міліметра. Е.Орван і Д.Ірвін запропонували враховувати енергію пластичного деформування, увівши у формулу замість дійсної питомої поверхневої енергії W ефективну поверхневу енергію:

$$W_{\text{еф}} = W + W_p, \quad (4.19)$$

де W_p – робота пластичного деформування при утворенні одиниці поверхні.

Тоді умова квазикрихкого руйнування металів набуває виду

$$\sigma_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2E \cdot W_{\text{еф}}}{\pi \ell_{\text{кр}}}}. \quad (4.20)$$

Досліди показують, що для сталей $W_p = 10^3 W$, тому у формулі (4.19) можна знехтувати значенням W і припустити, що $W_{\text{еф}} = W_p$. Позначивши $W_{\text{еф}} = W + W_p = G$, Ірвін показав, що:

$$\sigma_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2E \cdot G}{\pi \ell_{\text{кр}}}} - \text{для плоского напруженого стану}. \quad (4.21)$$

Для плоскої деформації (якщо $\varepsilon_z = 0$) замість модуля пружності E підставляється $E/(1-\mu^2)$ і формула має вигляд :

$$\sigma_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2E \cdot G}{\pi \ell_{\text{кр}} (1-\mu^2)}}. \quad (4.22)$$

У точці нестабільності швидкість вивільнення пружної енергії G (яку також називають рушійною силою поширення тріщини) досягає критичної величини і визначається як G_c , після чого відбувається руйнування.

Не слід змішувати початок руху тріщини, що пов'язаний з руйнуванням часток металу в міру зросту навантаження й зони пластичних деформацій у кінця тріщини, з початком руху тріщини за енергетичної умови, якщо напруження в зразку досягають максимально можливого для конкретного зразка значення.

При випробуванні навантаження силою P зразків крупних розмірів (рис.4.10) їхнє руйнування настає раптово на лінійній ділянці діаграми (рис.4.10, а) і визначення K_{Ic} і G_{Ic} відповідає моменту максимальних середніх напружень σ_c . Переміщення V реєструють напроти надрізу із тріщиною на базі АВ (рис.4.10, в, г). Якщо при визначенні K_{Ic} і G_{Ic} використовують зразки менших розмірів, то умова плоскої деформації цілком не витримується, і діаграма перестає бути лінійною (рис. 4.10, б). Тому застосовують умовну процедуру обробки результатів випробувань, проводячи лінію ON на 5% нижче лінії пружної ділянки і для визначення K_{Ic} і G_{Ic} береться напруження σ_Q . Величини K_{Ic} і G_{Ic} зветься критеріями Ірвіна.

За характеристику опірності металу початку руху тріщини використовується деформаційний критерій – критичне розкриття тріщини δ_c , що відповідає розкриттю тріщини в момент початку її руху.

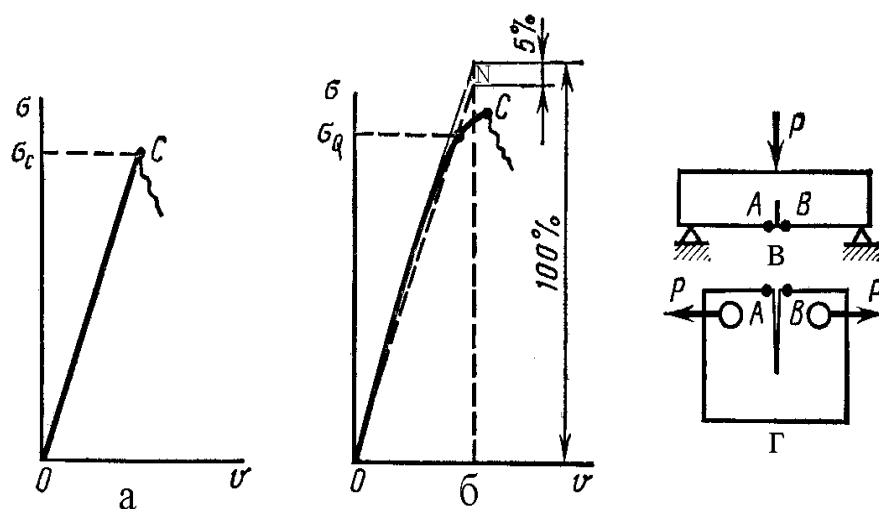


Рисунок 4.10 – Види кривих (а, б) “навантаження-зміщення” при визначенні K_{Ic} і G_{Ic} на зразках шляхом їхнього вигину (в), або розтягування (г) [9]

За методом Т. Каназави [4] (рис.4.11) зразок із двома однаковими надрізами (іноді великими 100×100 мм) згинають шляхом статичного або ударного вигину і доводять його до руйнування й визначають критерій:

$$\delta_c = \frac{4k_{1c}}{\pi\sigma_T} . \quad (4.23)$$



Рисунок 4.11 – Зразок із двома надрізами для визначення критерію δ_c

4.4 Поширення тріщини в загальному випадку

Розглянемо умову поширення тріщини в загальному випадку. З появою в металі наскрізної тріщини довжиною ℓ_0 і товщині металу S при одновісьовому розтягуванні звільняється енергія:

$$U_0 = \pi \ell_0^2 \sigma^2 S / 4E .$$

Можливість подальшого поширення тріщини (руйнування) залежить від того, яку кількість енергії U_{03} затрачено на пластичну деформацію поверхонь тріщини в зоні довжиною ℓ_0 . Позначивши затрати енергії на 1 мм^2 у зоні довжиною ℓ_0 через G_0 , тоді $U_{03} = G_0 \ell_0 S$.

Якщо руйнування виникло, то $U_0 - U_{03} > 0$, і є надлишкова енергія, що підтримує поширення тріщини за межами ділянки ℓ_0 . Довжина тріщини ℓ , що виникає, буде залежати від енергії $G_{сд}$, витраченої на пластичну деформацію за межами ℓ_0 . Довжина тріщини ℓ визначиться з рівності:

$$\pi \ell^2 \sigma^2 S / 4E = G_0 \ell_0 S + G_{сд} (\ell - \ell_0) S ,$$

тоді

$$\ell = \frac{2G_{\text{сд}} E}{\pi \sigma^2} - \frac{2}{\sigma} \sqrt{E^2 G_{\text{сд}}^2 / \pi^2 \sigma^2 - E \ell_0 (G_{\text{сд}} - G_0) / \pi}$$

Ця залежність справедлива при $G_{\text{сд}} > G_0$ и $\ell_0 \neq 0$.

Тріщина буде поширюватися без зупинки (як нестабільна), якщо вираження під радикалом дорівнюватиме нулю. Тоді:

$$\ell_{\text{кр}} = 2G_{\text{сд}} E / \pi \sigma^2.$$

Чим вище значення σ^2 , тим менше значення критичної довжини тріщини ($\ell_{\text{кр}}$), і тим більша ймовірність поширення тріщини як нестабільної. При невисоких напруженнях тріщина зупиниться, не виходячи із зони розтягуючих напружень.

4.5 Поширення тріщини при наявності в матеріалі крихкої зони

Розглянемо умову поширення тріщини у випадку наявності в матеріалі крихкої зони ℓ_0 (рис.4.12). Тріщина, поширюючись по крихкій зоні, затрачує на своє поширення мізерно малу кількість енергії. Звільняється надлишкова енергія, яка накопичується у вигляді кінетичної енергії рухомих часток металу. Потім ця енергія витрачається на просування тріщини в ділянку металу з високими пластичними властивостями. Розміри тріщини досягають критичних величин, після чого руйнування охоплює великі ділянки. Крива 1– вивільнювана енергія при русі тріщини. Ламана лінія ОАВ – витрати енергії на пластичну деформацію металу при русі тріщини. На ділянці ℓ_0 вони близькі до нуля. На ділянці АВ – лінійне зростання витрат енергії на рух тріщини по пластичній ділянці. Однак АВ не перетинає криву 1- це означає, що кількість вивільнюваної енергії більше витраченої, і тріщина буде рухатися без зупинки. Якщо метал за межами зони ℓ_0 має дуже високі пластичні властивості (лінія АС), то тріщина може зупинитися в точці Е (рис. 4.12, а).

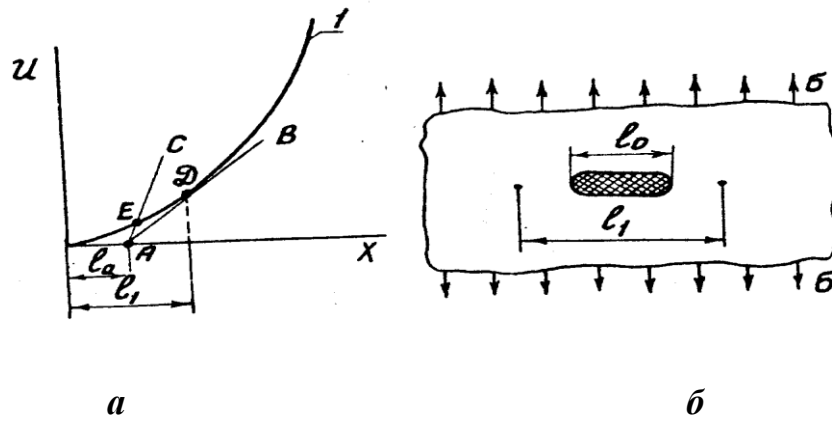


Рисунок 4.12 – Схема, що ілюструє вивільнення й поглинання енергії при русі тріщини в металі з крихкою зоною l_0

Допустимо, що в пластині (рис.4.12, б) рух тріщини йде без витрат енергії, і тріщина може поширитися до розміру l_1 . Повна енергія, що звільниться на ділянці l_1 :

$$U = \pi l_1^2 \sigma^2 / 4E ,$$

а витрати енергії на її поширення:

$$(\ell_1 - \ell_0)G,$$

де G – енергія, затрачувана на одиницю довжини тріщини в пластичному металі.

Нехай l_1 є критичною довжиною для даного значення G . Тоді:

$$(\ell_1 - \ell_0)G = \frac{\pi \ell_1^2 \sigma^2}{4E} ;$$

$$\ell_1 = \ell_{кр} = \frac{2GE}{\pi \sigma^2} ; \quad G = \frac{\pi \ell_1 \sigma^2}{2E} ;$$

$$(\ell_1 - \ell_0) \frac{\pi \sigma^2}{2E} = \frac{\pi \ell_1^2 \sigma^2}{4E} . \quad \text{Звідки } \ell_0 = \frac{\ell_1}{2} .$$

Таким чином, досить мати крихку зону ℓ_0 за довжиною у два рази

меншу критичної довжини тріщини ℓ_1 , щоб руйнування виникнувши, не припинилося, а розвивалося б як нестабільне. Якби була тріщина довжиною ℓ_0 , то вона вела б себе як стабільна й не розвивалася б, тому що критичний розмір ℓ_1 у два рази більше, ніж ℓ_0 .

4.6 Еквівалентна довжина тріщини

Хоча дефекти й концентратори у зварних з'єднань різноманітні, можлива їхня деяка схематизація й уніфікація. Неправильної форми тріщини, непровари, несплавлення, шлакові й оксидні включення, ланцюжки близько розташованих пор, підрізи, подряпини, місця переходу від наплавленого металу до основного можуть бути зведені до деякої еквівалентної довжини тріщини $\ell_{\text{екв}}$, якщо допустити можливість утворення у вістрях дефекту (тріщини) невеликої довжини $\Delta \ell$, порядку десятих часток міліметра.

На рис.4.13,б показаний розтягнутий зразок з вирізом, вершини якого мають $r = 0$ і кут α . Пряма 1 (рис. 4.13, а) показує зріст тріщини у випадку, якщо $\alpha = 0$, тобто, для звичайної тріщини. Крива 2 відповідає підростанню тріщини від концентратора з $\alpha \leq 30-50^\circ$. Вона при порівняно маленьких $\Delta \ell$ зливається із прямою 1, що вказує на практично однакове виділення енергії в таких концентраторах і в тріщини довжиною ℓ . При більш значних кутах α зміна енергії G відповідає ходу кривої 3. При фіксованому значенні $\Delta \ell_1$ підведена енергія відповідає G_e , що у свою чергу відповідає деякій еквівалентній довжині тріщини ℓ_e (рис. 4.13, а). Крива 4 відповідає утворенню тріщини в цілій розтягнутій пластині.

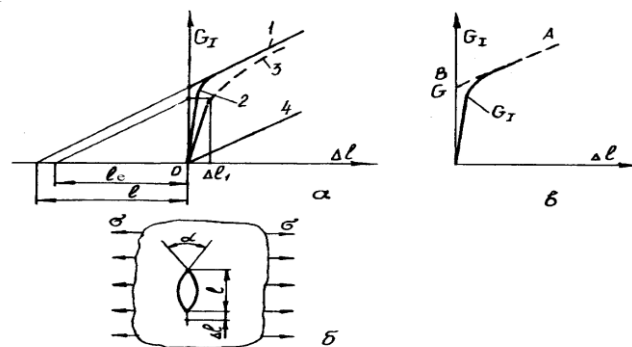


Рисунок 4.13 – Залежність зміни енергії G_I , що звільняється при підростанні тріщини на $\Delta \ell_1$ [2]

Таким чином, оцінка небезпеки концентраторів може бути зроблена також по кількості вивільнюваної енергії з появою у вершині концентратора невеликої тріщини по довжині, що еквівалентна тріщині при тому ж напруженні σ_{cp} :

$$\text{– для плоскої деформації: } \ell_e = \frac{2G_e \cdot E}{\pi \sqrt{1 - \mu^2} \cdot \sigma_{cp}^2}; \quad (4.24)$$

$$\text{– для плоского напруженого стану: } \ell_e = \frac{2G_e \cdot E}{\pi \cdot \sigma_{cp}^2}. \quad (4.25)$$

Різні форми елементів конструкцій з різними схемами їх навантаження дають різні G_e і ℓ_e , що дозволяє за величиною ℓ_e судити про те, якій довжині тріщини в нескінченній пластині відповідає той або інший концентратор. За критерієм ℓ_e можна порівняти різні за характером концентратори, якщо радіус r у них маленький. Складність такого підходу полягає у невизначеності вибору $\Delta \ell_1$ і G_e , а потім ℓ_e . Для кутів (рис.4.13,б) не більше 130...140° існує наближений метод – побудова кривої G_1 до рівня $\Delta \ell_1$ (рис. 4.13, в) з наступною екстраполяцією цієї прямолінійної ділянки від А до В з метою визначення G_e і наступним розрахунком ℓ_e . Таким чином, у випадку підростання тріщини на малу величину $\Delta \ell_1$ повна звільнювана енергія пропорційна $\Delta \ell_1$, тобто пропорційна накопиченій біля вершини тріщини енергії.

4.7 Енергетичні методи визначення опірності металу утворенню й поширенню тріщини

Розповсюджена оцінка властивостей металу за роботою, що витрачається на пластичну деформацію зразків з концентраторами. У даному випадку визначається робота при пружнопластичній деформації деякого об'єму металу, який примикає до перерізу з концентратором. Більшість методів, які дозволяють визначити роботу на стадії зародження тріщини A_3 , є комплексними. Для визначення роботи зародження тріщини A_3 використовують зразки 10x10x55 мм із однобічним надрізом 2 мм. На них діє сила P , вимірюється вигин f і будується діаграма (рис. 4.14).

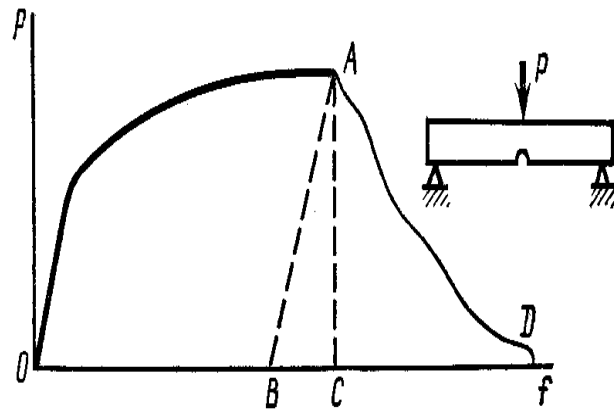
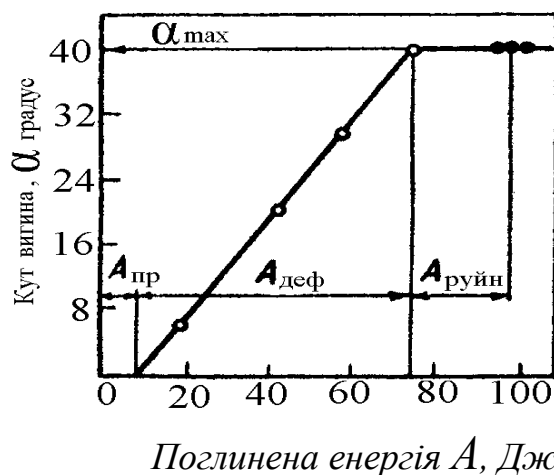


Рисунок 4.14 – Визначення роботи зародження A_z і роботи поширення A_p тріщини при вигині надрізаного зразка

Площа OAB пропорційна роботі вигину зразка до появи тріщини; площа ABC пропорційна пружній енергії, накопиченій у зразку до початку його руйнування; площа, що залишилася, характеризує роботу A_p , яка витрачається на поширення тріщини по тілу зразка.

Метод Л.С.Лівшиця й А.С.Рахманова

За методом Л.С.Лівшиця й А.С.Рахманова випробовується серія надрізаних однакових зразків, збільшуючи енергію удару на кожному наступному зразку і визначаючи кут вигину зразка (рис. 4.15). Величину енергії підвищують до рівня, при якому з'являється тріщина. Частину зразків руйнують повністю, визначаючи максимальний кут вигина $\alpha_{\max}$. За результатами випробувань будується графік, з якого можна визначити сумарну роботу до появи тріщини ($A_{\text{пр}} + A_{\text{деф}}$), а також роботу на поширення тріщини (A_p).



о – незруйновані зразки; • – повністю зруйновані зразки

Рисунок 4.15 – Схема для визначення складової роботи ударного вигину

Метод Н. Кано й Е.Імбембо

За діаграмою розтягування визначається робота до появи тріщини й робота, що витрачена на поширення тріщини у зразку (рис. 4.16) [1].

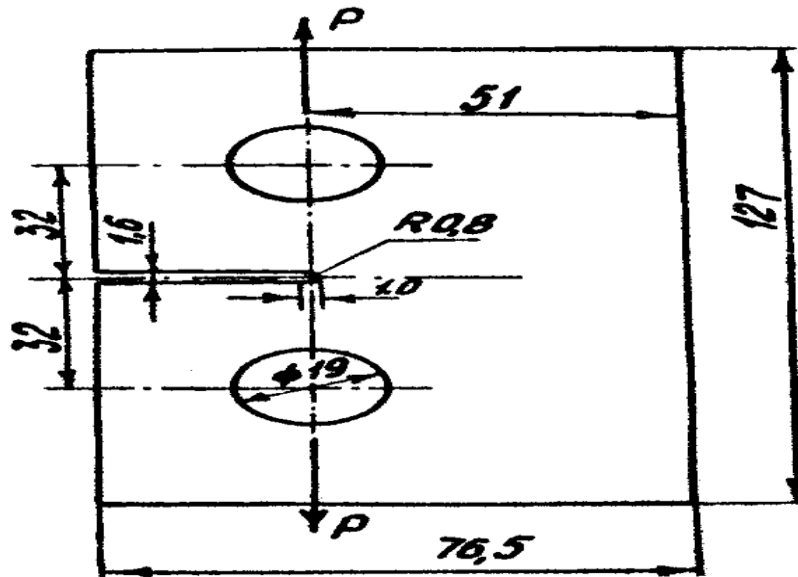


Рисунок 4.16 – Форма й розмір зразка Н.Кано й Е.Імбембо

Розподіл роботи на складові можливий також при використанні зразків з різними радіусами надрізу (методи А.П.Гуляєва і В.С.Іванової).

Метод А.П.Гуляєва [1]

За даним методом серія зразків з різними радіусами надрізу (рис.4.17) випробовується на ударний вигин.

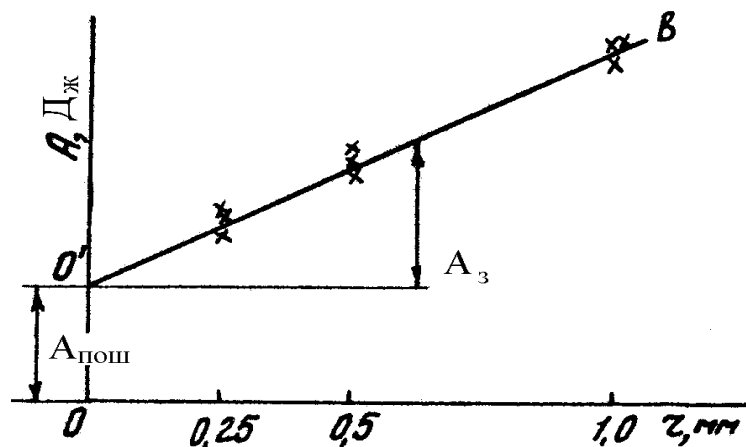


Рисунок 4.17 – Обробка результатів випробувань надрізованих зразків на ударний вигин

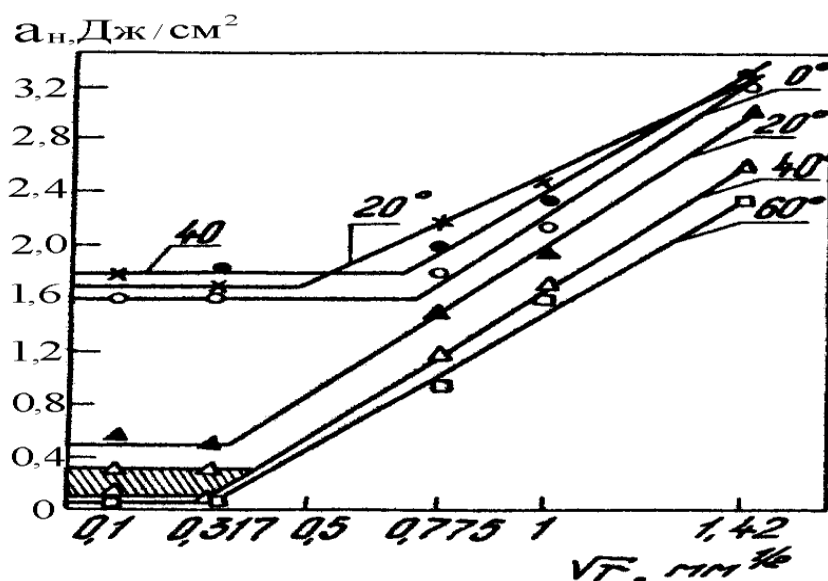
За результатами випробувань, при яких реєструється повна робота A , поглинена зразком при руйнуванні, проводиться пряма $O'B$ і визначаються:

A_3 - робота, що йде на вигин зразка до появи тріщини.

A_p - робота, що йде на поширення тріщини в зразку.

Метод В.С.Іванової [2]

Будується графік (рис.4.18) залежності ударної в'язкості не від радіуса надріза r , а від величини $\sqrt{r}$.



▲, ○ – гострий; ●, * – за радіусом надрізу

Рисунок 4.18 – Розподіл ударної в'язкості на складові для сталі 15Г2 при різних температурах випробування

Передбачається, що при деякому малому радіусі надрізу, робота вигину зразка стає вкрай малою і вся енергія витрачається на поширення тріщин. Відрізок за віссю ординат між горизонтальною й похилою ділянкою ламаної лінії визначає роботу зародження тріщини A_3 , що залежить від геометрії надрізу.

4.8 Силкові критерії руйнування [2]

Руйнування матеріалу внаслідок розвитку тріщини зосереджене в

малому колі вершини тріщини, де дуже висока концентрація напружень і яка обумовлена малим радіусом закруглення. Напружений стан у цій зоні, користуючись методами теорії пружності, можна в загальному виді виразити формулою

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta), \quad (4.26)$$

де $i, j = x, y$ – координатні вісі;

$f_{i,j}$ – деяка функція кута θ .

Коефіцієнт K залежить від виду навантаження, величини навантаження, форми тріщини і називається коефіцієнтом інтенсивності напружень (сила/довжина^{3/2}). У залежності від виду навантаження (див рис.4.8) він позначається відповідно індексами I, II, III, тобто K_I, K_{II}, K_{III} . При плоскому напруженому стані для навантаження за схемою I (деформація розтягування) формули (4.26) напруження мають вигляд:

$$\sigma_x = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2} \theta\right); \quad (4.27)$$

$$\sigma_y = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2} \theta\right); \quad (4.28)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2} \theta. \quad (4.29)$$

Переміщення U і V у напрямку вісей X і Y (рис. 4.19), відповідно, визначаються за формулами:

$$U = \frac{2K_1(1+\mu)}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\frac{1-\mu}{1+\mu} + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right); \quad (4.30)$$

$$V = \frac{2K_1(1+\mu)}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(\frac{2}{1+\mu} - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right). \quad (4.31)$$

Коефіцієнт інтенсивності напруження біля вершини тріщини при

плоскій деформації

$$K_1 = \lim_{\theta \rightarrow 0} \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_y(r, \theta); \quad (4.32)$$

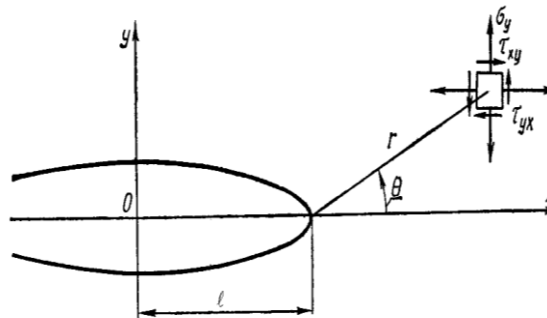


Рисунок 4.19 – Полярні координати r і θ з полюсом у вершині тріщини

При розтягуванні пластини із тріщиною довжиною 2ℓ за схемою рис.4.19 нормальні напруження в перетині пластини навколо тріщини будуть дорівнювати:

$$\sigma_y = \sigma \frac{x}{\sqrt{x^2 - \ell^2}} = \sigma \frac{\ell + r}{\sqrt{2\ell \cdot r + r^2}}; \quad (4.33)$$

де x – координата, що відлічується від середини тріщини; тоді

$$r = x - \ell.$$

Біля вершини тріщини, при $x \rightarrow \ell$ і $r \rightarrow 0$, напруження необмежено зростає за модулем. Підставляючи рівняння для σ_y (4.33) у рівняння для обчислення K_1 (4.32) і, обчислюючи, знаходимо:

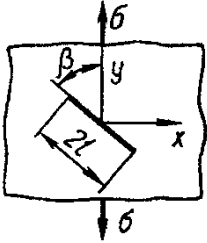
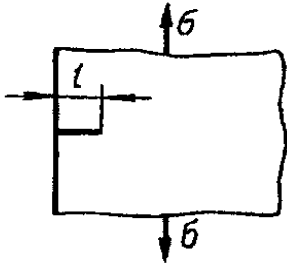
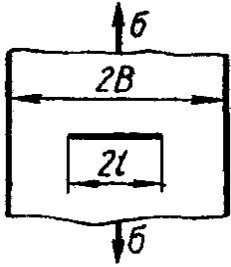
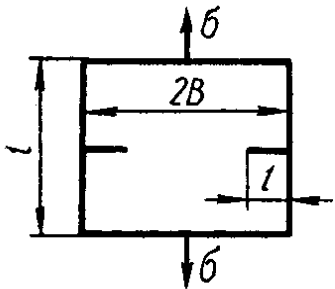
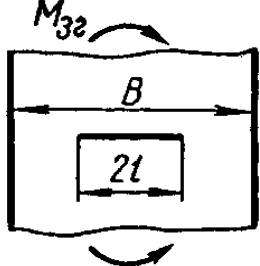
$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi \cdot \ell}. \quad (4.34)$$

Для пластин обмежених розмірів при різних видах навантаження й розташування тріщин критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень визначається за формулою

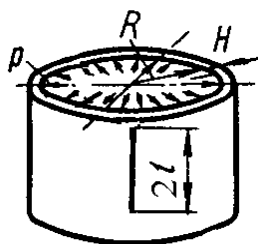
$$K_{1c} = f_{1кр} \cdot \sigma_{кр} \sqrt{\pi \ell_{кр}}, \quad (4.35)$$

де $f_{1кр}$ – поправкові коефіцієнти, які наведені у довідковій літературі та у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Вирази для $f_{1кр}$ [5]

Вид навантаження і розташування тріщини	Схема	Поправкова функція
Розтягання необмеженої пластини з похилою тріщиною в середині		$f_{1кр} = \sin^2 \beta$
Розтягання півнескінченної пластини з однією боковою тріщиною		$f_{1кр} = 1.12$
Розтягання пластини завширшки 2B з поперечною тріщиною посередині		$f_{1кр} = \sqrt{\frac{2B}{\pi l} \operatorname{tg} \frac{\pi l}{2B}}$
Розтягання пластини завширшки 2B з двома боковими тріщинами		$f_{1кр} = \frac{0,2B}{\pi l} \sin \frac{\pi l}{B} \sqrt{\frac{2B}{\pi l} \operatorname{tg} \frac{\pi l}{2B}}$
Згинання в площині пластини завширшки B і завтовшки H з поперечною тріщиною посередині		$f_{1кр} = \frac{8}{3\sqrt{6}} \frac{Hl}{B^2} \left(1 - \mu^2 \right)^{1/4}$

Дія внутрішнього тиску p на циліндричну трубу діаметром $2R$ завдовжки H при поздовжній наскрізній тріщині



$$f_{1\text{кр}} = \sqrt{1 + 1,61 \frac{\ell^2}{RH}}$$

У лінійній механіці руйнування виходять із припущення, що тріщина поширюється тоді, коли коефіцієнт інтенсивності напруження та інтенсивність вивільненої енергії досягають критичного значення характерного для даного матеріалу і тоді критерій розвитку тріщини для нормального відриву має вигляд: $K_1 = K_{1c}$ і $G_1 = G_{1c}$.

Для плоского напруженого стану енергія, що вивільняється, дорівнює

$$G_1 = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot \ell}{2E},$$

а для умов плоскої деформації:

$$G_1 = \frac{(-\mu^2 \pi \sigma^2 \ell)}{2E}.$$

Отже маємо два еквівалентних формулювання критерію руйнування:

1) енергетичне, згідно з яким припускається, що тріщина може поширюватися тоді, коли інтенсивність вивільненої енергії G досягає критичного значення:

$$G_{1c} = \frac{\partial U_{\text{нов}}}{\partial \ell} = 2W = \text{const};$$

2) силове, відповідно до якого тріщина може розвиватися при досягненні коефіцієнтом інтенсивності напружень K свого критичного значення:

$$K_c = \text{const}.$$

Енергетичний критерій є необхідною умовою поширення тріщини, але він не обов'язково повинен бути достатнім. Якщо матеріал при вершині тріщини не перебуває на грані руйнування, то тріщина не буде зростати навіть при достатній енергії для її розвитку. Матеріал повинен до кінця виче-

рпати свою здатність сприймати навантаження й продовжувати деформуватися, тобто силовий критерій повинен бути еквівалентним енергетичному, між якими існує залежність:

$$G_{1c} = k_{1c}^2 / E \quad \text{– плоский напружений стан;}$$

$$G_{1c} = (1 - \mu^2) k_{1c}^2 / E \quad \text{– плоска деформація.}$$

За допомогою цих співвідношень можна розрахувати граничний стан елементів конструкцій із тріщиною, а також оцінювати механічні властивості матеріалу і його здатність гальмувати розвиток тріщин.

4.9 Оцінка розмірів пластичної зони уздовж тріщини [1]

У товстих пластинах з тріщиною біля вістря виникає плоский деформований стан, а у тонких – плоский напружений стан, при якому розмір пластичної зони біля кінця тріщини більше ніж у товстому металі. Величина K_{1c} як критерій стійкості тріщини може бути справедливою тільки для достатньо товстих пластин, де пластична зона біля кінця тріщини мала.

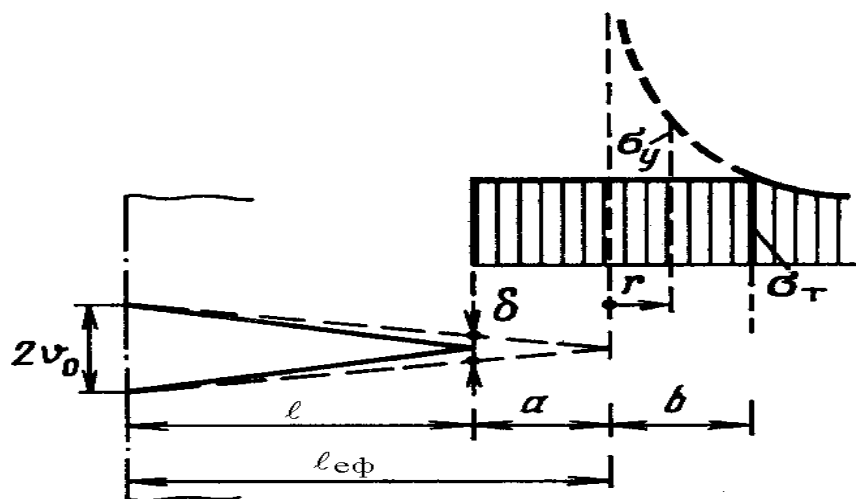


Рисунок 4.20 – Схема визначення пластичної зони вповдовж тріщини

Д.Ірвінім було показано, що наявність пластичної зони можна урахувати, якщо замість довжини фізичної тріщини $2l$ в розрахунках використовувати ефективну довжину $2l_{ef} = 2(l + a)$, де a – поправка на пластичність. Її можна знайти із рис.4.20, на якому на всій довжині зони пла-

стичності $r_p = a + b$ напруження σ_y прийняті рівними σ_T . Крива пружних напружень σ_y змінюється за законом $\sigma_y = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}}$. Площина під пунктирною кривою σ_y дорівнює площині прямокутної епюри на довжині $(a+b)\sigma_T$, а рівність напружень σ_y межі текучості σ_T при $r = b$, тобто $\frac{K_1}{\sqrt{2\pi b}} = \sigma_T$ Із двох рівнянь знаходимо: $r = a = b = \frac{K_1^2}{\sqrt{2\pi\sigma_T^2}}$. 4.36)

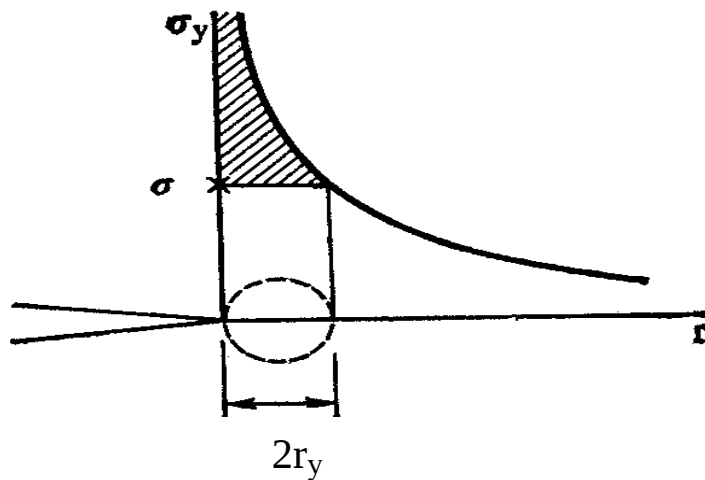


Рисунок 4.21 – Оцінка розміру зони пластичності

З рис. 4.21 видно, що напруження $\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}}$, яке виникає безпосередньо перед тріщиною, буде перевищувати σ_T на деякій відстані r від вершини тріщини, тобто r обмежує зону пружного напруження.

Енергетичний критерій для нестабільного розвитку тріщини довжиною 2ℓ має вигляд:

$$G_{1c} = \frac{K_{1c}^2}{E} = 2W_{кр} = \frac{\pi\sigma_{кр}^2 \cdot \ell}{E}, \quad (4.37)$$

де $W_{кр}$ – критична енергія деформації, яка потрібна для утворення вільної поверхні тріщини при наявності пластичних деформацій.

Вираз для коефіцієнта інтенсивності напружень K_1 з урахуванням рішення для σ_y дозволяє приблизно визначити довжину пластичної зони r_T уздовж тріщини. Так, при $\sigma_y = \sigma_T$ для напруженого стану у пластині необмежених розмірів:

$$r_T = \frac{K_1^2}{2\pi\sigma_T^2},$$

або з урахуванням виразу: $K_1 = \sigma\sqrt{\pi\ell}$;

$$r_T = \frac{1}{2} \cdot \ell \left(\frac{\sigma}{\sigma_T} \right)^2. \quad (4.38)$$

Для пластини обмеженої ширини:

$$r_T = \frac{1}{2} \cdot \ell \left[\frac{\sigma}{\sigma_T} \right]^2 \cdot f_{1кр}. \quad (4.39)$$

Тоді половина довжини тріщини з урахуванням пластичної зони (рис. 4.22):

$$\ell_T = \ell + r_T = \ell \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma}{\sigma_T} \right)^2 \right] \quad (4.40)$$

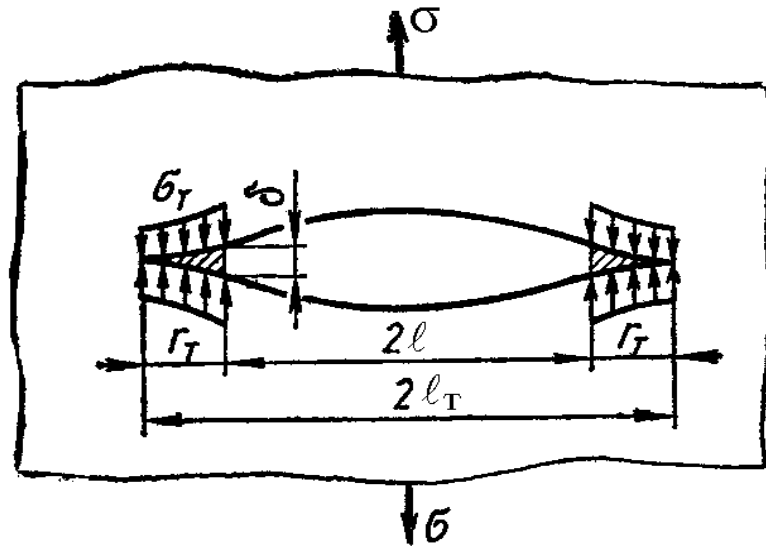


Рисунок 4.22 – Схема розкриття тріщини

Користуючись величиною ℓ_T , за наведеними вище формулами можна визначити K_{1c} , а потім і переміщення v біля вершини тріщини. Для плоского напруженого стану при $r = r_T$, $\theta = \pi$.

$$V = \frac{K_1(1+\mu)}{E} \sqrt{\frac{r_T}{2\pi}} \left[\frac{3-\mu}{1+\mu} - 1 \right]. \quad (4.41)$$

Подвоєна величина V дорівнює розкриттю тріщини δ .

$$\delta = 2V_{r=r_T} = 2 \left(1 - \mu \right) \frac{\sigma^2}{E \sigma_T^2} \ell \sqrt{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma}{\sigma_T} \right)^2} \quad (4.42)$$

У випадку крихкого руйнування при $\sigma < \sigma_T$ розкриття тріщини приблизно можна знайти за формулою

$$\delta = \frac{\sigma^2}{\sigma_T E} \pi \cdot \ell. \quad (4.43)$$

Результати обчислення розкриття тріщини за формулою (4.43) при $\sigma \leq \sigma_T$ підтверджуються експериментально.

При плоскому деформованому стану внаслідок того, що значення δ і Γ менші, то довжина пластичної зони зменшується в кілька разів порівняно з такою при плоскому напруженому стану.

З урахуванням розміру зони пластичної деформації по пластині з коефіцієнтом інтенсивності напружень K , коефіцієнт інтенсивності напружень K_{ef} визначається за рівнянням, що включає ефективну довжину тріщини:

$$\ell_{ef} = \ell + r_T.$$

$$K_{ef} = \frac{\sigma \sqrt{\pi \ell}}{\left[1 - 0,5 \left(\frac{\sigma}{\sigma_T} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} = \sigma \sqrt{\pi \ell \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{K^2}{\sigma_T^2} \right) \right]}. \quad (4.44)$$

де ℓ - половина довжини тріщини.

Коефіцієнт K_{ef} завжди більше K_1 , але в умовах низьких напружень різниця може бути невеликою. Розміри пластичної зони біля вершини тріщини для одного і того самого матеріалу залежать від ступеня деформації уздовж переднього краю тріщини. Ступінь стиску деформації залежить від товщини зразка S (рис.4.23), зі збільшенням якої напружений

стан змінюється від плоского напруженого, при якому $\sigma_z = 0$, до об'ємного при плоскій деформації, коли $\sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y)$.

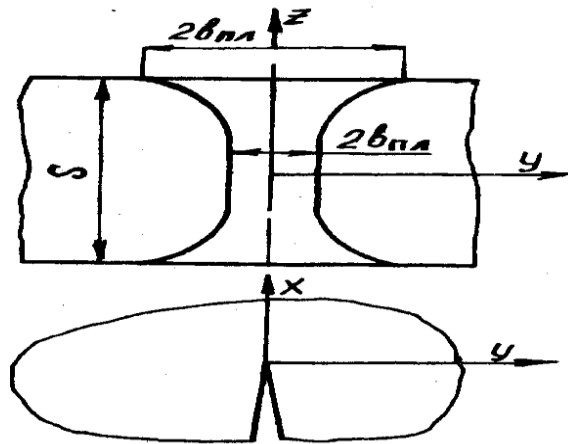


Рисунок 4.23 – Схема розподілу пластичних деформацій за товщиною елемента

Руйнування одного і того ж самого металу в умовах плоского напруженого стану й в умовах плоскої деформації різне. В умовах плоскої деформації стоншення металу неможливе ($\epsilon_z = 0$), залишкова повна деформація вдовж тріщини ϵ_x також дорівнює нулю, тобто залишкова деформація ϵ_y може перебувати у межах пружних деформацій. Під час плоскої деформації витрати енергії на пластичну деформацію створюють руйнуючі деформації γ_{xy} , які визначають розмір зони пластичної деформації, $V_{пл}$. На поверхні листа, де існує плоский напружений стан, зона пластичних деформацій $2V_{пл}$ істотно більша (рис.4.23). Між зоною на глибині, що працює при плоскій деформації, і зонами на поверхнях, виникають значні дотичні напруження τ_{zx} і τ_{zy} , які не дозволяють поверхневим зонам деформуватися незалежно від зони в глибині. Розмір зони пластичних деформацій зростає при поступовому стонненні металу приблизно до товщини S , які дорівнюють сумі двох розмірів губ зсуву. При цьому на бічній поверхні плоского зразка за умови відсутності тут зовнішнього тиску завжди має місце плоский напружений стан, тому розміри пластичної зони біля вільної поверхні зразка завжди більше, ніж у середній частині (рис. 4.24). Оскільки в середній частині зразка має місце об'ємний напружений стан, то опір руйнуванню в цій зоні буде меншим, а тому й фронт просування тріщини буде видаватися вперед. Для зразків різної тов-

щини співвідношення пластичних зон спереду тріщини різне.

У зв'язку з цим змінюється значення енергії, витраченої на руйнування й існує наступна залежність характеристики тріщиностійкості – коефіцієнта інтенсивності напружень K_c від товщини зразка:

$$K_c = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\ell};$$

$$K_c^2 = K_{1c}^2 (1 + 1,4 \beta_{1c}^2); \quad (4.45)$$

$$\beta_{1c} = \left(\frac{1}{S} \right) \left(\frac{K_{1c}}{\sigma_T} \right)^2, \quad (4.46)$$

де S – товщина металу;

K_c – коефіцієнт інтенсивності напружень для плоского напруженого стану;

K_{1c} – коефіцієнт інтенсивності напружень для плоскої деформації;

β_{1c} – коефіцієнт, який враховує перехід від K_c до K_{1c} у залежності від товщини.

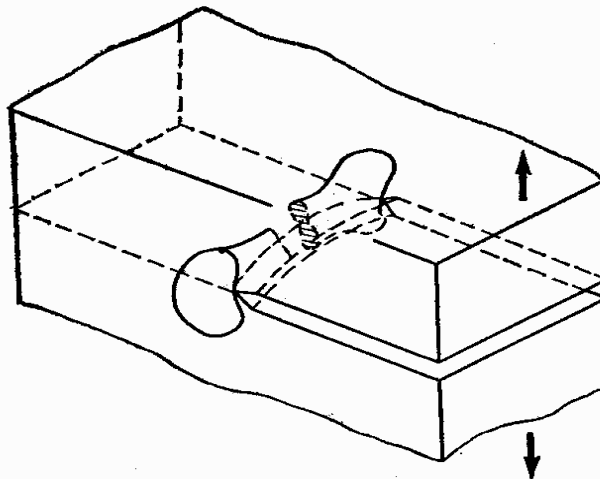


Рисунок 4.24 – Форма пластичної зони поперед вершини тріщини у товстому плоскому зразку [1]

На рисунку 4.25 наведена графічна залежність K від товщини металу, з якого видно, що зі збільшенням товщини металу спостерігається перехід від плоского напруженого стану до плоскої деформації.

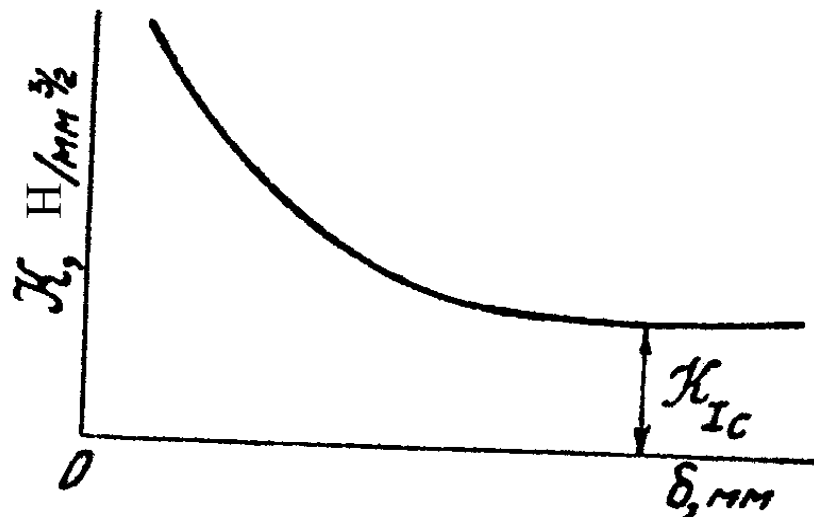


Рисунок 4.25 – Залежність K від товщини металу

4.10 Методи визначення опірності металу поширенню тріщин

Для оцінки опірності металу на стадії поширення тріщин використовуються різноманітні якісні й кількісні характеристики. Для визначення K_{IC} (G_c (G_{IC}), δ_c використовуються зразки з наявністю попередньо створеною тріщиною. Чим вище в'язкість металу й нижче його межа текучості σ_T , тим більш великі потрібні зразки для конкретного визначення зазначених вище характеристик. Серед якісних характеристик більш об'єктивними є енергетичні.

Існує багато методів визначення роботи поширення тріщини на зразках щодо малих розмірів (10x10x55мм). Загальним недоліком цих методів є ігнорування впливу товщини металу на роботу поширення тріщини й використання для випробувань пластичних (в'язких) металів таких за розміром зразків, у середині яких не може розміститися зона пластичних деформацій, що утвориться наприкінці тріщини у великому зразку. Тому ці методи повинні розглядатися як засіб для порівняльних випробувань металів. При крихких руйнуваннях використання цих методів утруднено. Низка методів визначення роботи поширення тріщини засновані на використанні зразків, у яких робота зародження тріщини зведена до мінімуму за рахунок високої гостроти надрізу.

Метод Б.А. Дроздовського – у зразку 10x10 і $\Gamma = 3$ мм заздалегідь створюється утомлена тріщина. Зразок руйнується на маятниковому копрі.

Реєстрована робота приймається за роботу поширення тріщини.

Метод Отані. Попереднім ударом на копрі в зразку створюють тріщину деякої глибини, яку офарблюють спецрозчином. Наступним ударом зразок руйнують повністю, а визначена робота є шуканою величиною.

Метод Шарпі. У зразку 10x10 x 55мм створюється V-образний надріз, що знижує роботу зародження тріщини, а визначена робота приймається за роботу поширення тріщини.

Метод К. Хартбауера і Г. Орнера [1]

Для виключення роботи пластичної деформації в зонах зрушення (3) використовують зразки Шарпі з товщиною 10 і 5мм.

Передбачається, що робота в зонах зрушення у зразках із шириною 10 і 5 мм однакова. Тоді різниця робіт, яка віднесена до різниці площин дає роботу поширення тріщини без зони зрушення (A_p) (рис. 4.26):

$$A_p = \frac{A_{10} - A_5}{F_{10} - F_5} \quad (4.47)$$

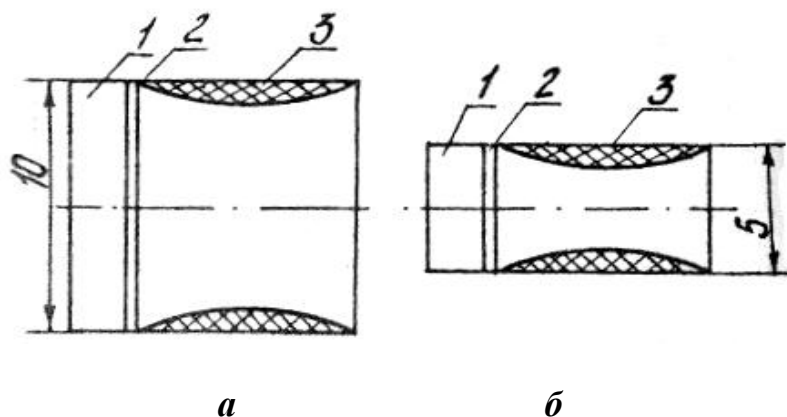


Рисунок 4.26 – Зразки шириною 10 і 5 мм із надрізом Шарпі (1), з утомленою тріщиною (2) і зоною зрушення (3)

Метод В.Г. Кудрявцева й В.С. Іванової

За даним методом опірність поширенню тріщини визначається на великих зразках з діаметром 8 мм і з V-образним кільцевим надрізом, що зменшує площу перетину зразка вдвічі; кут надрізу 45 і 60°, радіус надрізу не більше 0,03мм. Зразки випробовують на ударний осьовий розрив і визначають затрачувану питому роботу на поширення тріщини.

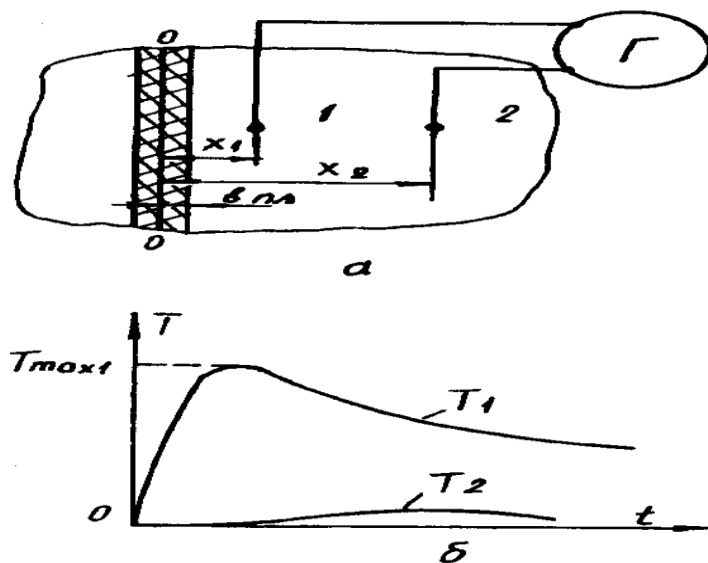
Метод теплової хвилі

При поширенні тріщини робота витрачається на пластичну деформацію (95%), що перетворюється в тепло й утворення в пластично деформованому шарі залишкових напружень (5%). При поширенні тріщини виділяється тепло, яке викличе в точці 1 зміну температури (рис.4.27). Знаючи X і реєструючи $T_{\max}$, можна визначити роботу руйнування за рівнянням

$$G_D = 4,13 c \rho x \Delta T_{\max}, \quad (4.48)$$

де $c\rho$ – об'ємна теплоємність.

На деякій відстані від місця проходження тріщини заздалегідь на поверхні металу або в глибоких тонких отворах приварюють електроди у вигляді проводів діаметром 0,2 мм, які утворюють термопари (рис. 4.27,а). Спай 1 повинен розташовуватися на відстані $X = 3...15$ мм від тріщини, а спай 2 на достатній відстані, щоб, коли температура у точці 1 досягне максимуму, температура в точці 2 змінилася б незначно.



а - схема розташування електродів у зоні передбачуваного руху тріщини;

б – термічний цикл у точці 1

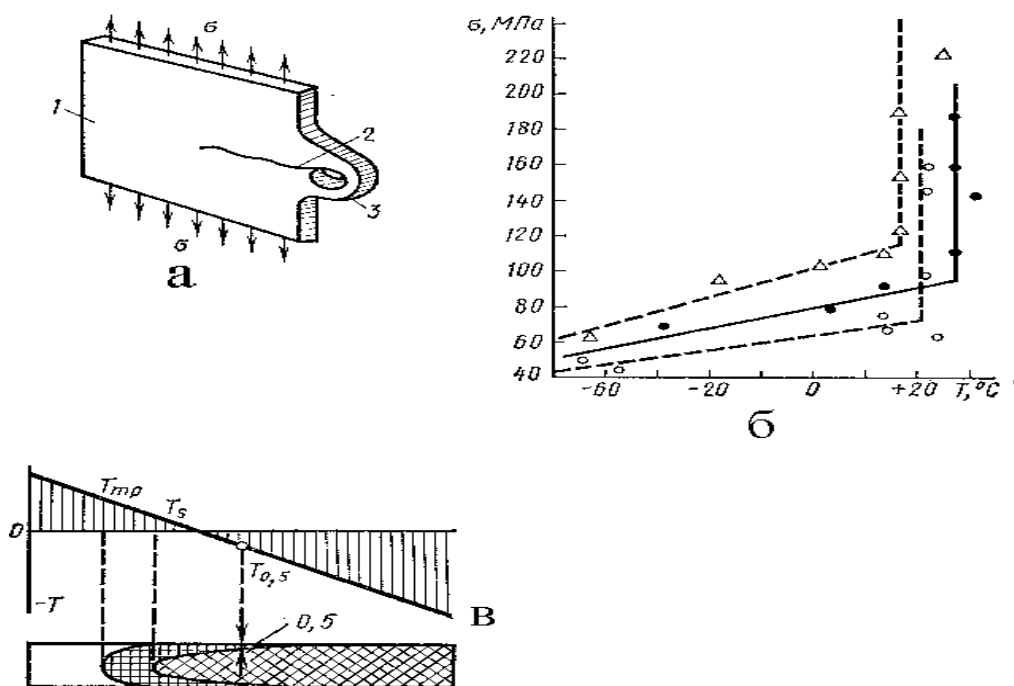
Рисунок 4.27 – Визначення роботи поширення тріщини шляхом реєстрації $T_{\max}$ за методом теплової хвилі

Для оцінки опірності металу руху тріщини використовують також різні неенергетичні характеристики: волокнистість зламу, швидкість поширення

тріщини, які можуть давати порівняльну оцінку здатності металу пручатися поширенню тріщини (при зміні температури або іншого фактора). Ці характеристики побічно пов'язані з роботою, що витрачається на поширення тріщини в металі.

Метод Т.Робертсона

Використовуються зразки (рис. 4.28,а) великої ширини (кілька сотень міліметрів). Перед руйнуванням зразок з однієї сторони підігрівається пальником (1), а з іншої (2) охолоджується рідким азотом. Різні зразки випробовують при різних напруженнях. До зразка спочатку прикладають розтягуюче напруження, а потім завдають удару кулею для створення рухомої тріщини. У деякій зоні з відомою температурою тріщина зупиняється. Будується діаграма. Точки на діаграмі відповідають температурі зупинки тріщини. При більш низьких напруженнях або при більш високих температурах тріщина зупиняється. Різні сталі мають різні значення критичної температури $T_{кр}$ і напруження $\sigma_{кр}$. Найбільш високій температурі відповідає точка закінчення зони руйнування $T_{тр}$.



*а – зразок (1 - місце нагрівання; 2 – місце охолодження;
3 – місце нанесення удару);*

б – результати випробувань для трьох різних сталей;

в – характер зламу

Рисунок 4.28 – Випробування за методом Т. Робертсона [9]

За характеристику може бути взята температура $T_{0,5}$ у точці, де шири-

на зони зрушення досягає 0,5мм і температура T_s - точка закінчення зони крихкого зламу, тобто критичні температури необхідно розглядати як відносні.

Так як фронт тріщини не завжди є прямолінійним, то є невизначеність у величині температури зупинки тріщини, тому результати оцінюють за характером зламу (рис.4.28, в). Є ділянка зовсім крихкого зламу – косе штрихування; потім зона зрушення – пряме штрихування, яка збільшує свою ширину в області високих температур. При температурі вище T_s крихкі ділянки зникають повністю. У середній частині пластини тріщина проходить до точки $T_{тр}$.

Метод інституту Баттеля

Випробовують на ударний вигин зразки розміром 305 x 76 x δ , які мають за товщиною надріз глибиною близько 5мм. В області перехідних температур у зоні розтягування є ділянка кристалічного зламу, інша частина зразка руйнується в'язко. За критерії беруть різні температури (наприклад, температура, при якій 50% площі руйнування мають кристалічний злам, або крихка зона досягає середини ширини зразка й ін.). Волокнистість зламу (В) визначається за формулою

$$B = \frac{F_v}{F_v + F_{кр}}, \quad (4.49)$$

де F_v – площа в'язкого зламу;

$F_{кр}$ – площа крихкого зламу.

Установлено, що характер зламу залежить від обсягу металу, залученого в пластичну деформацію під час руйнування. Крихкі ділянки відповідають малій пластичній деформації поверхневих шарів; в'язкі волокнисті злами, навпаки, свідчать про велику пластичну деформацію металу, що вказує на більшу роботу, витрачену при руйнуванні. Між роботою, витраченою на поширення тріщини, й площею волокнистих ділянок зламу мається приблизно пропорційна залежність. Зменшення площі волокнистих ділянок у зламі при зниженні температури свідчить про зменшення роботи руйнування й зниження опірності металу руйнуванню. Характеристика волокнистості зламу використовується для визначення критичних температур (наприклад, $T_{кр.1}$, при якій отримується 50% волокнистого зламу).

Швидкість руху тріщини

Установлено, що крихким руйнуванням відповідають високі швидкості поширення тріщин, а в'язким – малі. Метод передбачає наклеювання двох дротиків, інтервал часу між обривами яких дозволяє приблизно визначити час просування тріщини на ділянці "X" і визначити її швидкість (рис.4.29).

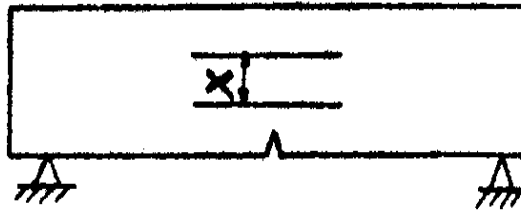


Рисунок 4.29 – Зразок із дротиками, які дозволяють реєструвати швидкість руху тріщини

Ця характеристика особливо важлива для трубопроводів. Якщо тиск устигає понизитися до деякого рівня, то поширення тріщини зупиниться. При великих швидкостях руху тріщини тиск у трубопроводі не встигає істотно знизитися до прибуття вістря тріщини у розглянуту зону. Отже, зберігаються високі розтягуючі напруження, які підтримують поширення тріщини уздовж труби. Для трубопроводів, які перебувають під тиском, це важливо, тому що в них важливим параметром є швидкість скидання тиску.

Крихким руйнуванням відповідають високі швидкості поширення тріщин (більше 500...600 м/с; напівкрихких та пластичних (в'язких) - 100...400 м/с і менш).

4.11 Приклади і їх рішення

Приклад 1 **1**. Сталева пластина із центральним дефектом довжиною 16 мм за товщиною піддається дії напруження величиною 350 МПа, яке направлено за нормаллю до площини тріщини. Який буде розмір пластичної зони й рівень ефективної інтенсивності напружень в області вершини тріщини, якщо межа текучості становить 1400 МПа і якщо піддати пластину термообробці з одержанням $\sigma_T = 385$ МПа ?

Рішення

Припускаючи, що пластина нескінченно велика, r_T визначимо з рівняння:

$$r_T = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \left(\frac{K_c^2}{\sigma_T^2}\right),$$

де $K_c = \sigma \sqrt{\pi \ell}$, а ℓ - $1/2$ довжини тріщини.

$$r_T = \left(\frac{1}{2 \cdot 3,14}\right) \left(\frac{350^2 \cdot 3,14 \cdot 0,008}{1400^2}\right) = 0,25 \text{ мм}.$$

У зв'язку з тим, що величина відношення r_T/ℓ дуже мала ($0,25/16 = 0,015$), то K_{ef} не буде істотно перевищувати K_c (на 2%).

$$K_{ef} = \frac{\sigma \sqrt{\pi \ell}}{\left[1 - 0,5 \left(\frac{\sigma}{\sigma_T}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} = \frac{350 \cdot \sqrt{3,14 \cdot 0,008}}{\left[1 - 0,5 \left(\frac{350}{1400}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} = 56,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{\frac{1}{2}};$$

$$K_c = 350 \sqrt{3,14 \cdot 0,008} = 55,3 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{\frac{1}{2}}.$$

Після термообробки пластини розмір пластичної деформації складе:

$$r_T = \left(\frac{1}{2 \cdot 3,14}\right) \left(50 \sqrt{3,14 \cdot 0,008} / 385\right)^2 = 3,3 \text{ мм},$$

тобто розмір зони пластичної деформації складе вже $1/5$ від повної довжини тріщини, а ефективний коефіцієнт інтенсивності напружень буде значно більше (на 28,4%).

$$K_{ef} = \frac{350 \sqrt{3,14 \times 0,008}}{\left[1 - 0,5 \left(350/385\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} = 72,4 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}.$$

Приклад 2 [1]. Пластина зі сплаву із межею текучості $\sigma_T = 415 \text{ МПа}$ має значення $K_{1c} = 132 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$, яке визначено для товщини $\delta = 250 \text{ мм}$. Необхідно визначити для широкої пластини товщиною 100 мм на яку ве-

личину зможе зрости тріщина від отвору у центрі пластини до початку руйнування при діючому на пластину напруженні $\sigma_d = 100$ МПа.

Рішення

Буде невірно використовувати рівняння $K_c = \sigma \sqrt{\pi \ell}$ і підставити в нього значення $K_{1c} = 132 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, тому що товщина 100 мм буде займати проміжне положення між плоскою деформацією й плоским напруженим станом. Але значення K_c можна визначити, якщо використати емпіричне співвідношення:

$$K_c^2 = K_{1c}^2 (1 + 1,4 \beta_{1c}^2),$$

де $\beta_{1c} = (1/S)(K_{1c}/\sigma_T)^2$,

S – товщина пластини.

$$\beta_{1c} = (1/0,1)(132/415)^2 = 1,01;$$

$$K_c^2 = 132^2 (1 + 1,4 \cdot 1,01) = 41817,6 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}, \quad K_c = 204,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}.$$

Знаходимо критичну довжину тріщини для товщини пластини 250 мм.

$$\ell_1 = K_{1c}^2 / \sigma_d^2 \pi = 132^2 / 100^2 \times 3,14 = 0,55 \text{ м},$$

де ℓ_1 – половина довжини тріщини, а повна довжина тріщини буде дорівнювати 1,1 м.

Для товщини металу 100 мм половина критичної довжини тріщини буде дорівнювати:

$$\ell = K_c^2 / \sigma_d^2 \times \pi = 204,5^2 / 100^2 \times 3,14 = 1,33 \text{ м}, \text{ а повна довжина } 2,66 \text{ м.}$$

$$2,66 - 1,1 = 1,56 \text{ м.}$$

Приклад 3 . Визначимо запас міцності циліндричної посудини діаметром $D = 480$ мм і товщиною стінки $H = 8,5$ мм, що працює в умовах кімнатної температури під внутрішнім тиском $P = 28$ МПа і в якій при обстеженні було виявлено з внутрішнього боку півеліптичну тріщину завглибшки $\ell = 3$ мм та завдовжки вподовж твірної $2a = 8,5$ мм (рис.4.30). Матеріал посудини - сталь (межа текучості $\sigma_T = 1000$ МПа; межа міцності $\sigma_B = 1200$ МПа)

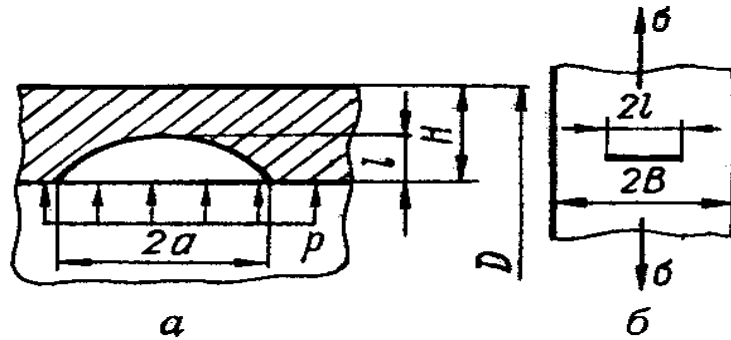


Рисунок 4.30

Рішення

Для визначення характеристики тріщиностійкості сталі було проведено випробування відповідних зразків в умовах кімнатної температури при статичному навантажуванні за схемою рис.4.30, б. Зразки завширшки $2B$ та товщиною, що дорівнювала товщині стінки посудини (8,5 мм), мали центрально розташовані тріщини завдовжки $2\ell = 10$ мм. Номінальне напруження, при якому зразки руйнувалися за мінімальним перерізом, дорівнювало $\sigma_H = 720$ МПа. Наслідки випробувань свідчать, що при вибраній товщині зразка його матеріал перебував у крихкому стані, а запас міцності в цьому разі можна розрахувати, використовуючи теорію лінійної механіки руйнування, тому критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Ic} можна знайти, користуючись першою формулою системи

$$K_{Ic} = f_{Icr} \sigma_{кр} \sqrt{\pi \ell_T},$$

де f_{Icr} – поправковий коефіцієнт, що враховує систему навантажування, тип, розміри зразка і характер тріщини;

$\sigma_{кр}$ – номінальне руйнівальне напруження в неослабленому перерізі;

ℓ_T – довжина тріщини з урахуванням пластичної зони у її вершині

Напруження $\sigma_{кр}$ знайдемо через номінальне напруження в ослабленому перерізі:

$$\sigma_{кр} = \frac{\sigma_H (2B - 2\ell) H}{2BH} = \sigma_H \left(1 - \frac{\ell}{B}\right) = 720 \left(1 - \frac{5}{20}\right) = 540 \text{ МПа}.$$

Умовна довжина тріщини ℓ_T на підставі формули 4.40:

$$\ell_T = \ell \left[1 + 0,5 \left(\frac{\sigma_{KP}}{\sigma_T} \right)^2 \right] = 5 \left[1 + 0,5 \left(\frac{540}{1000} \right)^2 \right] = 5,72 \text{ мм} .$$

Поправковий коефіцієнт :

$$f_{1кр} = \sqrt{\frac{2B}{\pi \ell_T} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi \ell_T}{\ell B} \right)} = \sqrt{\frac{40}{3,14 \times 5,72} \operatorname{tg} \frac{3,14 \times 5,72}{40}} = 1,04 .$$

Тоді згідно з формулою

$$K_{1c} = f_{1кр} \sigma_{кр} \sqrt{\pi \ell_T} = 1,04 \times 540 \sqrt{3,14 \times 5,72} = 2290 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{\frac{1}{2}} .$$

Цей коефіцієнт використовують для обчислення номінального руйнівного напруження в посудині із зазначеною вище тріщиною. Номінальне головне напруження в стінці посудини (вважаємо її тонкостінною), яке намагається зруйнувати посудину за твірною, згідно з формулою Лапласа:

$$\sigma_{1н} = \frac{PD}{2H} = \frac{28 \cdot 480}{2 \cdot 8,5} = 791 \text{ МПа} .$$

Коефіцієнт інтенсивності напруження K_{1c} для розглядуваної тріщини, згідно з формулою 4.40 , без урахування пластичної деформації:

$$K_{1c} = f_{1кр} \sigma_{1кр} \sqrt{\pi \ell} ,$$

де $\sigma_{1кр}$ – критичне руйнівне напруження для посудини;

ℓ - половина глибини тріщини.

Поправковий коефіцієнт для ненаскрізної напівеліптичної поверхневої тріщини завглибшки ℓ (мала піввісь) і завдовжки на поверхні $2a$ (a - велика піввісь) у пластині завтовшки H :

$$f_{1кр} = \frac{1}{\Phi_0} \left[1 + 0,12 \left(1 - \frac{1}{a} \right) \right] \sqrt{\frac{2H}{\pi \ell} \operatorname{tg} \frac{\pi \ell}{2H}} \sqrt{1 + 1,61 \frac{a^2}{RH}} , \quad (4.50)$$

де Φ_0 – величина, що залежить від співвідношення ℓ / a (при збільшенні;

ℓ / a від 0,1 до 1, то Φ_0 рівномірно збільшується від 1 до $\pi/2$).

Отже, при $\ell / a = 3 / 4,25 = 0,71$ співвідношення становить 1,39. Тоді, підставляючи у формулу (4.50) відомі величини, знайдемо:

$$f_{1кр} = \frac{1}{1,39} \left[1 + 0,12 \left(\frac{\ell}{a} - 0,71 \right) \sqrt{\frac{2 \cdot 8,5}{3,14 \cdot 3} \operatorname{tg} \frac{3,14 \cdot 3}{2 \cdot 8,5}} \sqrt{1 + 1,61 \frac{8,5^2}{240 \cdot 8,5}} \right] = 0,81.$$

Критичне напруження для посудини:

$$\sigma_{1кр} = \frac{K_{1c}}{f_{1кр} \sqrt{\pi \ell}} = \frac{2290}{0,81 \sqrt{3,14 \cdot 3}} = 920 \text{ МПа}.$$

Глибина тріщини з урахуванням пластичної деформації, що виникла в її вершині, згідно з формулою (4.40):

$$\ell_T = \ell \left[1 + 0,5 \left(\frac{\sigma_{кр}}{\sigma_T} \right)^2 \right] = 3 \left[1 + 0,5 \left(\frac{920}{1000} \right)^2 \right] = 4,25 \text{ мм}.$$

Вважаючи, що розмір тріщини $2a$ зростає пропорційно, знайдемо:

$$a_T = \frac{\ell_T}{\ell} a = \frac{4,25}{3} 8,5 = 12,1 \text{ мм}.$$

Поправковий коефіцієнт $f_{1кр}$, згідно з формулою 4.50:

$$f_{1кр} = \frac{1}{1,39} \left[1 + 0,12 \left(\frac{\ell}{a} - 0,71 \right) \sqrt{\frac{2 \cdot 8,5}{3,14 \cdot 4,25} \operatorname{tg} \frac{3,14 \cdot 4,25}{2 \cdot 8,5}} \sqrt{1 + 1,61 \frac{12,1^2}{240 \cdot 8,5}} \right] = 0,91.$$

Тоді значення уточненого руйнівного напруження з урахуванням пластичної деформації $\ell_T = 4,25 \text{ мм}$ та $f_{1кр} = 0,91$.

$$\sigma_{1кр} = \frac{K_{1c}}{f_{1кр} \sqrt{\pi \ell}} = \frac{2290}{0,91 \sqrt{3,14 \cdot 4,25}} = 695 \text{ МПа}.$$

Для визначення руйнівного напруження $\sigma_{1кр}$ у другому наближенні слід у формулі (4.40) другого наближення урахувати скориговані розміри тріщини:

$$\ell_T = \ell \left[1 + 0,5 \left(\frac{\sigma_{кр}}{\sigma_T} \right)^2 \right] = 3 \left[1 + 0,5 \left(\frac{695}{1000} \right)^2 \right] = 3,74 \text{ мм};$$

$$a_T = \frac{\ell_T}{\ell} a = \frac{3,74}{3} 8,5 = 10,6 \text{ мм}$$

Тоді поправковий коефіцієнт $f_{1кр}$, згідно з формулою 4.50:

$$f_{1кр} = \frac{1}{1,39} \left[1 + 0,12 \left(-0,71 \sqrt{\frac{2 \cdot 8,5}{3,14 \cdot 3,74}} \operatorname{tg} \frac{3,14 \cdot 3,74}{2 \cdot 8,5} \sqrt{1 + 1,61 \frac{10,6^2}{240 \cdot 8,5}} \right) \right] = 0,89.$$

Руйнівне напруження в другому наближенні:

$$\sigma_{1кр} = \frac{K_{1с}}{f_{1кр} \sqrt{\pi \ell}} = \frac{2290}{0,89 \sqrt{3,14 \cdot 3,74}} = 750 \text{ МПа}.$$

Подальше наближення не дає істотного уточнення. Отже здобуте критичне напруження $\sigma_{1кр}$ порівняно з номінальним напруженням у стінці $\sigma_{1н}$ дає змогу визначити запас міцності стінки посудини з тріщиною:

$$n = \frac{\sigma_{1кр}}{\sigma_{1н}} = \frac{750}{791} = 0,948.$$

Оскільки $n < 1$, то експлуатація посудини із зазначеним дефектом недопустима.

5 ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ НА РОБОТОЗДАТНІСТЬ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Сучасний рівень технології виробництва зварних конструкцій не дозволяє уникнути появи дефектів. Їхній вплив і виправлення здійснюють відповідно до рекомендацій галузевих нормативно-технологічних документів, що встановлюють характер і розміри дефектів, які підлягають виправленню. Ці документи орієнтуються на досягнутий у кожній області рівень техніки, технології зварювання й контролю якості. Однак, такий підхід неприйнятний при прискорених темпах впровадження нових матеріалів і способів зварювання.

Відсутність обліку функціонального зв'язку: розмір дефекту – умови роботи при встановленні норм викликає необґрунтовані вимоги виправлення дефектів, що не зменшують несучу здатність конструкції; або навпаки, допуску таких, які можуть призвести до експлуатаційної відмови. При зварюванні дефектних місць можливе утворення нових дефектів, навіть більш небезпечних, ніж тих, що виправляються.

Формування зварних з'єднань у процесі зварювання відбувається під впливом великої кількості факторів. Форма, розміри, поверхні зварних швів завжди мають відхилення від проектних. Радіуси з'єднань швів з основним

металом коливаються у широких межах. Взаємне розташування з'єднаних елементів також може відрізнятися від проектного через зсуви й кутові повороти. Суцільність металу зварних з'єднань у деяких випадках порушується через появу пор, шлакових включень, плівок оксидів, несплавлення шва з основним металом, тріщин, надрізів, напливів й ін. Подібні відхилення на практиці виявляються неминучими і впливають на механічні властивості зварних з'єднань. Ступінь впливу різних відхилень у різних умовах експлуатації буде різним. Тому не всякі відхилення й не завжди їх відносять до дефектів зварних з'єднань. Дефектами вважають такими, які мають неприпустимі відхилення. Норми, відповідно до яких відхилення відносять до дефектів і браку, повинні в першу чергу встановлюватися на основі вивчення їхнього впливу на міцність та інші експлуатаційні властивості зварних з'єднань.

5.1 Проблема обліку впливу дефектів на роботоздатність зварних з'єднань

Проблема впливу дефектів на міцність зварних з'єднань у край складна й багатопланова. Вирішити її можна, з урахуванням умов експлуатації, характеру дефекту й властивостей металу зварного з'єднання. Дослідження в області впливу дефектів на міцність групуються навколо окремих питань. В особливі напрямки відокремлюються питання: а) впливу дефектів при змінних навантаженнях, в умовах корозії, при низьких і високих температурах і т.і.; б) у залежності від виду дефекту розглядається вплив тріщин, непроварів, пор, зрушень, місць переходу від наплавленого металу до основного й т.і.; в) дослідження різних матеріалів: високоміцних сталей, алюмінієвих і титанових сплавів.

У зв'язку з таким різноманіттям проблем, у даному курсі розглядаються тільки найбільш принципові питання чутливості металу до концентрації напружень, а саме при наявності тріщин як найнебезпечніших дефектів при статичних і динамічних навантаженнях.

5.2 Оцінка впливу тріщиноподібних дефектів за силовим і деформаційним критеріями. Вплив товщини металу

При статичних навантаженнях питання про вплив дефектів на міцність у більшості випадків зводиться до питання про чутливість металу до концентрації напружень. При цьому, намітилися два напрямки в оцінці чутливості – на базі апарату механіки руйнування відносно тріщин і тріщино-

подібних дефектів і на базі теорії концентрації напружень.

Під дією статичного навантаження при наявності тріщин за міру чутливості (нечутливості) до концентрації напружень в умовах плоскої деформації (як найбільш напруженому стану) використовується критичний коефіцієнт інтенсивності напружень металу K_{1c} . Чим він вище, тим менш чутливий метал до концентрації напружень. Однак, при іншій температурі експлуатації той же самий метал може виявитися чутливим до концентрації напружень. Так як кожний метал має певний рівень міцності (σ_T і σ_B) і звичайно призначений для роботи при напруженнях трохи менших σ_T , то оцінку нечутливості в присутності тріщин більш точно можна дати у відношенні до K_{1c}/σ_T . Цю величину можна розглядати як пропорційну кореню квадратному з довжини тріщини у нескінченній пластині, при якій середнє руйнівне напруження дорівнює σ_T . Тоді [9]:

$$K_{1c}/\sigma_T = \sigma_T \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\ell_T} / \sigma_T = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\ell_T}, \quad (5.1)$$

де ℓ_T – довжина тріщини, що викликає руйнування металу при $\sigma = \sigma_T$.

Для високоміцних сталей розмір ℓ_T становить міліметри або десятки часток міліметра (ці сталі вкрай чутливі до наявності тріщин); низьколеговані сталі невисокої міцності при кімнатній температурі мають ℓ_T , вимірюване десятками міліметрів, тобто чутливість цих сталей до концентрації напружень розрізняються більш ніж у 10 разів.

Однак не завжди товщина металу достатня, щоб були створені умови плоскої деформації. Але відхід від плоскої деформації не означає перехід до плоского напруженого стану. В умовах неплоскої деформації існує широка гама проміжних напружених станів.

Товщина пластини суттєво впливає на напружено – деформований стан при вершині тріщини. Для визначення в'язкості руйнування матеріалу K_{1c} для умови плоскої деформації, потрібен товстий зразок в залежності від співвідношення $(K_{1c}/\sigma_T)^2$. У тонких зразках, в яких розмір зони пластичності не малий порівняно з товщиною, виникає плоский напружений стан. Існує оптимальна товщина B_0 , при якій в'язкість досягає свого максимального значення, яке звичайно беруть рівною дійсній в'язкості руйнування при плоскому напруженому стані (рис.5.1). У перехідній області між B_0 і B_s в'язкість набуває проміжного значення [9].

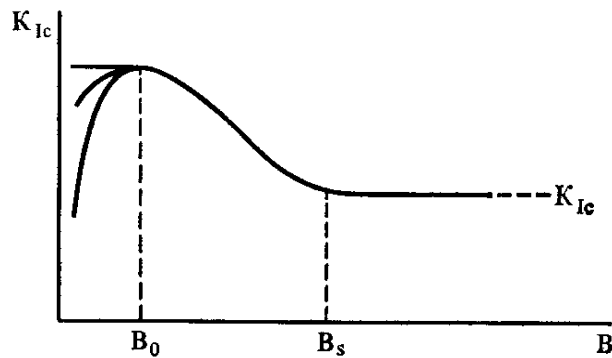
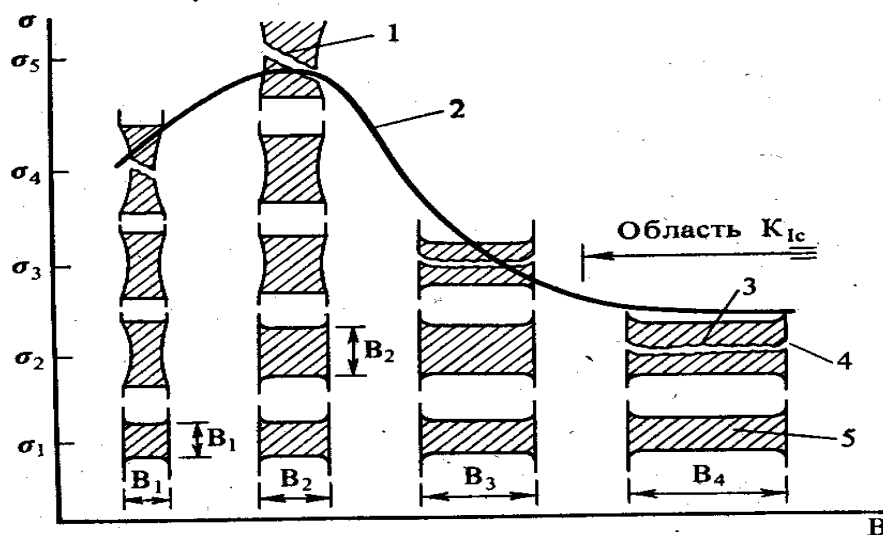


Рисунок 5.1 – Ударна в'язкість як функція товщини

Розглянемо чотири панелі з товщинами B_1, B_2, B_3, B_4 (рис.5.2).



- 1 – косо руйнування;
 - 2 – залежність залишкової міцності панелей із тріщинами від товщини;
 - 3 – плоске руйнування; 4 – губи зрушення; 5 – пластична зона
- Рисунок 5.2 – Залишкова міцність як функція товщини

Усі панелі мають однакову довжину тріщини й навантажені однаковим напруженням σ_1 : інтенсивності напружень у всіх панелях однакові, тобто зони пластичності в панелях мають однакові розміри. На рис. 5.2 показані поперечні перерізи чотирьох зразків; зони пластичності, що відповідають напруженню σ_1 , заштриховані.

У панелях B_2, B_3, B_4 вертикальні розміри зони пластичності ще менші товщини, тому в них не може розвиватися вільна текучість у напрямку товщини пластини; цей процес стримується пружним матеріалом. Таким

чином, деформація в напрямку товщини пластини залишається рівною нулю, тобто маємо плоский деформований стан. У панелі B_1 розмір зони пластичності дорівнює товщині, і текучість у напрямку товщини нічим не обмежується. Це означає, що в панелі B_1 може повністю розвиватися плоский напружений стан, і з цього моменту зона пластичності в панелі B_1 буде більше, ніж в інших панелях.

Збільшення напруження до величини σ_2 призведе до руйнування панелі B_4 , тому що в ній виникнуть достатні для цього напруження й деформації. Панель B_3 знаходиться в тих же умовах, що й панель B_4 , і у неї, імовірно, відбудеться деяке поширення тріщини. Однак через вплив областей із плоским напруженим станом (малим напруженням при вершині тріщини), які розташовані поблизу поверхні зразка і які у цій більш тонкій панелі мають порівняно більший вплив, сама панель ще не зруйнується. Панель B_2 перебуває в подібних умовах, однак товщина її тепер дорівнює розміру зони пластичності. Це означає, що в ній виникає плоский напружений стан. Подальше збільшення напруження призведе до руйнування при напруженні σ_3 панелі 3. При напруженні σ_4 деформації при вершині тріщини панелі B_1 стануть настільки великими, що відбудеться її руйнування. Однак панель B_2 не зруйнується, тому що з того моменту, як напруження досягло величини σ_1 деформації в панелі B_2 були менші, ніж деформації в панелі B_1 . Тому деформації в панелі B_2 ще недостатні для руйнування, незважаючи на те, що напруження в ній приблизно такі ж, як і у панелі B_1 . Для руйнування панелі B_2 необхідно подальше збільшення напруження до величини σ_5 . Панелі з товщиною, більшою за B_4 , руйнуються при тому ж напруженні σ_1 , що й панель B_4 . Тут лежить область руйнувань при плоскому деформованому стані. У більш тонких панелях B_1 утворюються більші деформації, й руйнування відбувається при більш низьких зовнішніх напруженнях σ_4 .

Таким чином, чим менше товщина прокату з того ж самого металу, тим менш чутливий він до концентрації напружень, тобто його руйнування при одній і тій довжині наскрізній або відносній глибині непрохідної тріщини буде відбуватися при більш високих напруженнях. Отже, товщина в металі є чинником, що не відноситься до властивостей металу, але впливає на його чутливість до наявності тріщин.

При наскрізних тріщинах нечутливість металу конкретної товщини до концентрації напружень в умовах неплоскої деформації оцінюється також відношенням $K_{сТ}/\sigma_T$. При цьому $K_{сТ}$ – найменший при розсіюванні значення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень металу K_c , які визначені при напруженнях менших σ_T . Це означає, що із серії значень K_c , знайдених і при $\sigma > \sigma_T$, $K_{сТ}$ – максимальне, котре може бути взагалі сприйнято металом даної товщини без руйнування при наявності наскрізної тріщини. Трактування $K_{сТ}/\sigma_T = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sqrt{\ell_T}$ залишається таким же самим, що й для формули (5.1).

Вид поверхонь руйнування зразків за товщиною S наведений на рис. 5.4, а критерії механіки руйнування можуть бути застосовані також і для не-прохідних тріщин, які поширюються від поверхні (рис.5.3).

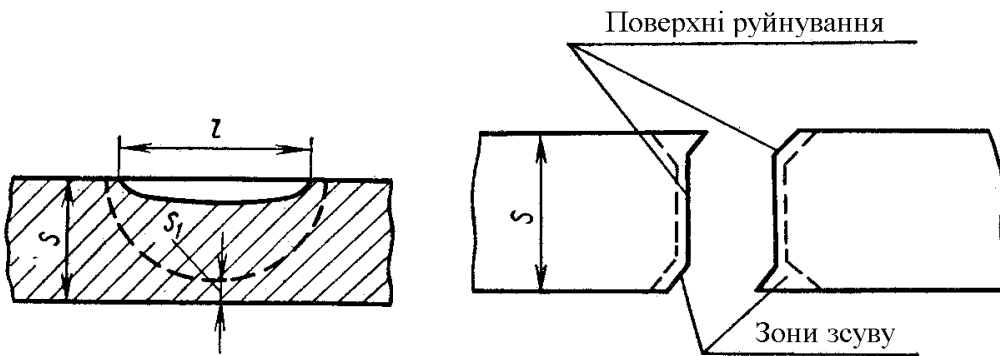


Рисунок 5.3 – Поверхнева тріщина
руйнування в металі

Рисунок 5.4 – Вид поверхонь
зразка з металу товщиною S

Ці тріщини при збільшенні напруження (навантаження) зростають переважно в напрямку товщини, мало збільшуючись за довжиною ℓ (рис.5.3). Навіть при невеликих товщинах S на більшій частині криволінійного фронту тріщини забезпечуються умовами плоскої деформації, що є несприятливими обставинами, тому що невеликі тріщини можуть стати критичними. При наближенні фронту тріщини до протилежної поверхні на ділянці S_1 різному за розміром у різних металів, виникають умови деформування металу, близького до плоского напруженого стану, що проявляється в підви-

щень пластичній деформації металу перед руйнуванням. Для обчислення K у залежності від рівня напружень і форми тріщини є відповідні формули у спеціальній літературі. При поверхневих (непрохідних) тріщинах оцінка нечутливості металу до концентрації напружень для деталей великого перетину також проводиться за співвідношенням $K_{ст}/\sigma_T$, тому що умови плоскої деформації тут можуть бути реалізовані повністю. При малих товщинах оцінка за $K_{ст}/\sigma_T$, тобто за силовим критерієм, призведе до абсурду, тому що при $\sigma_{кр} > \sigma_T$ значення K_c будуть виходити тим меншими, чим тонше метал. Для збереження єдності підходу до оцінки чутливості листового металу будь-якої товщини до концентрації напружень, як чутливих, так і нечутливих матеріалів при $\sigma_{кр} > \sigma_T$ необхідно переходити до деформаційного критерію механіки руйнування V_p і давати оцінку за співвідношенням :

$$\left(\frac{V_p}{\varepsilon_T}\right)\left(\sqrt{\frac{\pi}{2}}\right). \quad (5.2)$$

При $\sigma_{кр} < \sigma_T$ оцінку можна давати як за K_c , так і за V_p , тому що результати будуть виходити однаковими. Обчислення V_p при $\sigma_{кр} > \sigma_T$ виконується за тими ж формулами, що й K_c , але замість середнього розрахункового напруження в ослабленому перетині зразка береться середня деформація $\varepsilon_{ср}$. Маючи метали з різними властивостями й різною товщиною, можна розташувати їх за критерієм $K_{ст}/\sigma_T$, або $(V_p / \varepsilon_T) (\sqrt{\pi/2})$ у ряді нечутливості до концентрації напружень. Однак, варто мати на увазі, що той же самий метал різної товщини буде мати різну чутливість до наскрізної тріщини, але може мати однакову чутливість до непрохідної тріщини. У зразках з непрохідною тріщиною при однаковій чутливості й однаковій відносній глибині тріщини метал меншої товщини буде руйнуватися при більш високих напруженнях і деформаціях, чим той же метал більшої товщини, тому що на малій товщині неможливо мати тріщину більш глибоку, ніж товщина металу.

5.3 Чутливість зварних з'єднань до концентрації напружень

Для нетріщиноподібних дефектів різноманітної форми область нечутливості металу до концентрації напружень для конкретної товщини й конк-

ретного зварного з'єднання оцінюється за середніми руйнівними напруженнями. Якщо воно складає не менш $0,95\sigma_B$, то зварне з'єднання вважається нечутливим до концентрації напружень при наявності даного концентратора. На рисунку 5.5 показані криві зміни міцності зварних з'єднань із різною глибиною непровару при випробуваннях їх на розтягування.

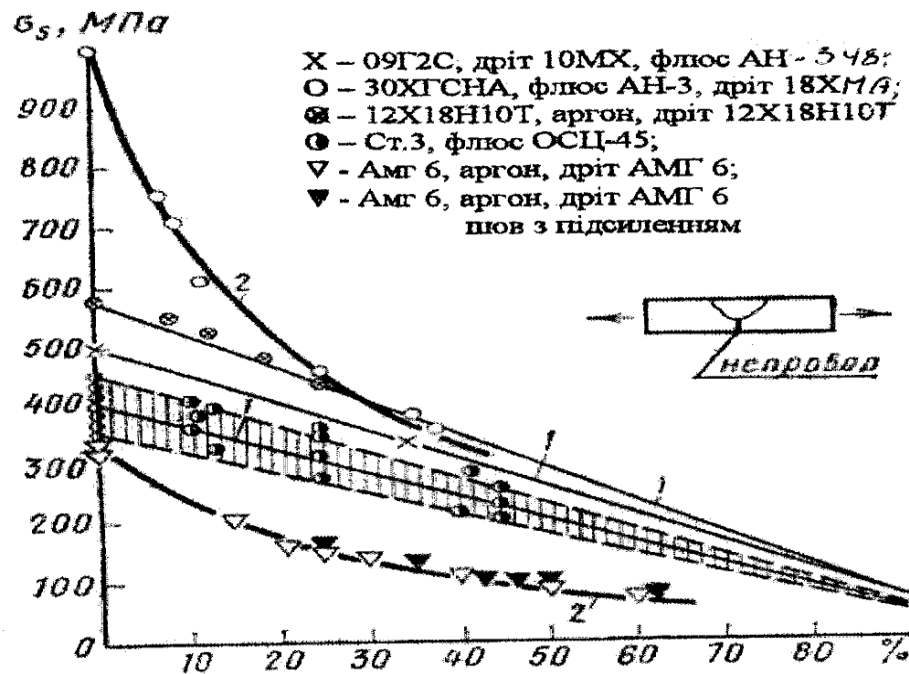


Рисунок 5.5 – Залежність міцності зварних з'єднань від глибини непровару [9]

Якщо зниження міцності відбувається прямо пропорційно зменшенню площі поперечного перерізу зварного з'єднання, тобто, $\sigma_{ср.р}$ залишається приблизно постійним, а σ_B знижується по прямій (лінія 1), то таке зварне з'єднання умовно вважається нечутливим до концентрації напружень. Якщо зниження міцності відбувається не пропорційно зміні поперечного перерізу (криві 2), то таке з'єднання вважають чутливим до концентрації напружень. Однак, слід зазначити, що мала зміна $\sigma_{ср.р}$ ще не свідчить про те, що метал зварного з'єднання ніяк не реагує на зміну коефіцієнту концентрації напружень. На рис. 5.6 крива 1 показує залежність умовного напруження від умовної деформації в гладкому зразку при статичному навантаженні.

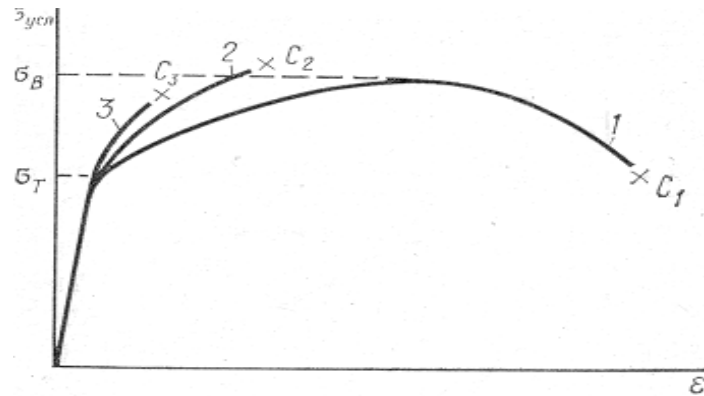


Рисунок 5.6 – Залежність середніх умовних напружень від середніх деформацій при розтягуванні зразків з різним ступенем концентрації напружень

При наявності невеликої концентрації напружень залежність середнього напруження від середньої деформації того ж металу виразиться кривою 2. У момент руйнування в точці C_2 середні напруження можуть виявитися вище σ_B , хоча середня деформація $\varepsilon_{cp.p}$ при цьому буде нижче, ніж у гладкого зразка. При збільшенні концентрації напружень (крива 3) знижується не тільки середня деформація, але й середнє руйнівне напруження в точці C_3 . Ступінь зниження $\sigma_{cp.p}$ залежить у кожному конкретному випадку від властивостей матеріалу й рівня концентрації напружень.

5.4 Коефіцієнти запасу за різними критеріями

Оцінка роботоздатності конструкцій у присутності тріщини або іншого гострого концентратора зводиться до визначення ряду коефіцієнтів запасу й порівняння їх із гранично припустимими. Числові значення коефіцієнтів установлюються галузевими документами. У розрахунках можуть використовуватися:

- коефіцієнт запасу за міцністю (за середніми руйнівними напруженнями):

$$n_{\sigma} = \sigma_{cp.p} / \sigma_e; \quad (5.3)$$

- коефіцієнт запасу за пластичністю (за середньою руйнівною деформацією):

$$n_{\varepsilon} = \varepsilon_{cp.p} / \varepsilon_e; \quad (5.4)$$

- коефіцієнт запасу за критичним числом циклів при циклічному навантаженні:

$$n_N = N_{кр} / N_e; \quad (5.5)$$

- коефіцієнт запасу за критичним розміром дефекту:

$$n_L = L_{кр} / L_e; \quad (5.6)$$

- коефіцієнти запасу за тріщиностійкістю, установлені коефіцієнтом інтенсивності напружень:

$$n_K = K_c / K_e; \quad (5.7)$$

- коефіцієнт інтенсивності деформацій :

$$n_V = V_p / V_e. \quad (5.8)$$

У цих залежностях σ_e , $\mathcal{E}_e$ – максимальні середні напруження й деформації в розрахунковому перетині в період експлуатації виробу або при його випробуваннях; $L_{кр}$ – критичний розмір дефекту (тріщини), що викликає руйнування при $\sigma = \sigma_e$; L_e – фактичний розмір дефекту (тріщини) у виробі, який у процесі експлуатації може змінюватися від початкового розміру $L_{еп}$ до кінцевого $L_{ек}$ за рахунок його підростання при циклічних навантаженнях із кількістю циклів у період експлуатації N_e ; $N_{кр}$ – кількість циклів навантаження, які викликають підростання тріщини до критичного розміру $L_{кр}$; $\sigma_{ср.р}$, $\mathcal{E}_{ср.р}$ – середні руйнівні напруження й деформації в розрахунковому перетині при наявності в ньому тріщини L_e (на початку експлуатації – $L_{ен}$, і наприкінці експлуатації $L_{ек}$); K_e й V_e - коефіцієнти інтенсивності напружень і деформацій у період експлуатації виробу, або при його випробуваннях, обчислені по σ_e , $\mathcal{E}_e$ й L_e ($L_{еп}$ або $L_{ек}$); K_c і V_p - критичні коефіцієнти інтенсивності напружень і деформацій при L_e ($L_{еп}$ або $L_{ек}$).

Для виконання зазначених вище перевірочних розрахунків необхідно мати наступні дані: 1) експериментальні значення $\sigma_{ср.р}$, $\mathcal{E}_{ср.р}$, а також K_c і V_p у всьому діапазоні зміни розміру тріщини L з обліком його геометричних співвідношень і положення (поверхнева тріщина, наскрізна); 2) експериментальні або розрахункові залежності підростання тріщини ΔL від

кількості циклів N при різних $\Delta\sigma$, тобто, всіма необхідними значеннями коефіцієнтів у формулі

$$dL / dN = C_0 \Delta\sigma^a,$$

де C_0 , a - постійні коефіцієнти, обумовлені експериментально.

Швидкість поширення тріщини dL / dN (мм/цикл) залежить від розмаху інтенсивності напружень $\Delta\sigma$ у межах циклу. Значення dL / dN змінюється в широких межах: від нуля при малих $\Delta\sigma$ і σ до 10^{-3} мм/цикл і більше.

На рисунку 5.7 наведені схематичні залежності значення $\sigma_{cr.p}$, $\varepsilon_{cr.p}$, K_c і V_p від розміру тріщини L . Процедура розрахунку різна залежно від того, чи відшукується припустимий розмір дефекту, або виконується перевірка допустимості вже наявного дефекту.

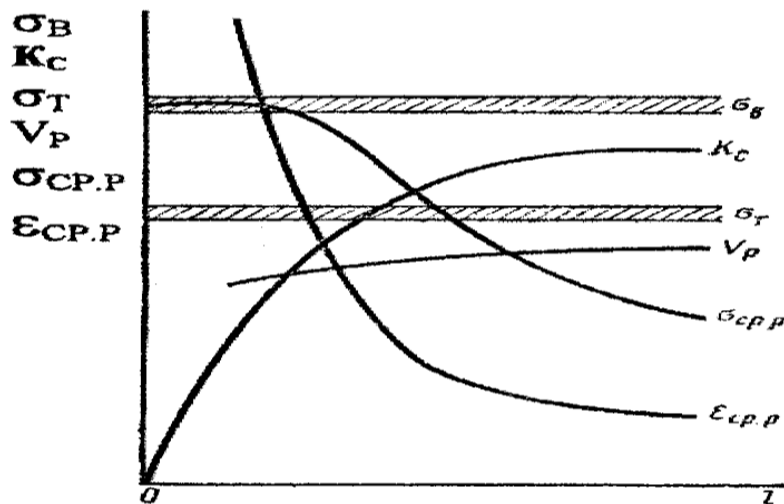


Рисунок 5.7 – Схематичні залежності σ_b , K_c , σ_t , V_p , $\sigma_{cr.p}$, $\varepsilon_{cr.p}$ від розміру тріщини [9]

5.5 Порядок розрахунку допустимості наявного дефекту [9]

Нехай відомий розмір і обриси початкового дефекту L_{ep} і експлуатаційні напруження σ_e при циклічному навантаженні.

1 За числом циклів навантаження N_e за період експлуатації визначається підростання тріщини й знаходиться L_{ek} .

2 Для L_{ep} і L_{ek} визначаються середні руйнівні напруження $\sigma_{cr.p}$ і деформації $\varepsilon_{cr.p}$, використовуючи дані рисунка.

3 Знаходиться значення n_{σ} за формулою (5.3), яке для конкретних конструкцій регламентується відповідними нормами. Рекомендується, щоб n_{σ} був не менш 1,75-2,5, якщо $\sigma_{\text{ср.р}} < \sigma_T$. Якщо $\sigma_{\text{ср.р}} > \sigma_T$, або $\sigma_e > 0,8 \sigma_T$, досить, щоб n_{ε} (формула 5.4) був не менш 7-15.

4 За рисунком при $\sigma_{\text{ср.р}} = \sigma_e$ знаходиться критичний розмір дефекту $L_{\text{кр}}$, а потім n_L за формулою (5.6). Рекомендується, щоб n_L був не менш 3 - 6, якщо береться початковий розмір дефекту $L_{\text{еп}}$, або не менш 2 - 3, якщо береться кінцевий розмір $L_{\text{ек}}$.

5 Знаючи розмір початкового дефекту й маючи дані для визначення підростання довжини тріщини по $L_{\text{ек}}$ визначають число циклів $N_{\text{кр}}$, а потім n_N за формулою (5.5), значення якого повинне бути не менш 10.

6 Коефіцієнт запасу по тріщиностійкості n_K знаходиться за формулою (5.7), обчисливши K_e за формулами лінійної механіки руйнування, тобто в припущенні справедливості формул для пружної стадії роботи матеріалу з обліком відомих σ_e , $L_{\text{еп}}$, $L_{\text{ек}}$, а K_c беруть при тих же $L_{\text{еп}}$ і $L_{\text{ек}}$.

7 Подібним чином знаходиться коефіцієнт інтенсивності деформацій V_e , який у пружній області дорівнює $2K_e E / \sqrt{\pi}$, а потім за формулою (5.8) коефіцієнт запасу n_v . Коефіцієнти запасу за тріщиностійкістю встановлюються технічними умовами. При лінійній залежності K від навантаження на конструкцію $n_k = n_{\sigma}$; $n_v = n_{\varepsilon}$.

5.6 Облік впливу механічної неоднорідності на рацездатність зварних конструкцій

До дефектів зварних з'єднань відноситься й неоднорідність механічних властивостей, коли вона досить велика. Наприклад, крихкі зони, тобто зони з низьким K_{1c} , можуть з'явитися навіть при малих розмірах дефекту джерелом руйнування. Небезпека крихких зон полягає в тому, що вони, перебуваючи за розмірами у два рази менше критичних розмірів тріщини для основного якісного металу, здатні викликати протяжні руйнування. Пояснення цього наведено на стр.75 даного посібника. У розрахунках крихку зону довжиною $L_{\text{кр}}$ необхідно розглядати як тріщину довжиною $2 L_{\text{кр}}$.

5.7 Оцінка роботоздатності стикових з'єднань при наявності дефектів типу несучільностей

Для визначення максимально припустимого розміру тріщиноподібного дефекту $L_{\max}$ закордонними авторами [2] запропоновано використання значення критичного розкриття кромки δ_c матеріалу в зоні розташування дефектів відповідно до рівнянь:

$$L_{\max} = \frac{\delta_c \cdot E \cdot \sigma_{0,2}}{2\pi \cdot \sigma_1^2} \quad \text{для} \quad \frac{\sigma_1}{\sigma_{0,2}} \leq 0,5; \quad (5.9)$$

$$L_{\max} = \frac{\delta_c \cdot E}{2\pi \cdot (\sigma_1 - 0,25\sigma_{0,2})} \quad \text{для} \quad \frac{\sigma_1}{\sigma_{0,2}} \geq 0,5; \quad (5.10)$$

де σ_1 – повне псевдопружне напруження поблизу дефекту

Ці рівняння можна застосовувати не тільки для наскрізних, але й для поверхневих і внутрішніх тріщиноподібних дефектів, використовуючи відповідні графічні залежності (рис.5.8, 5.9).

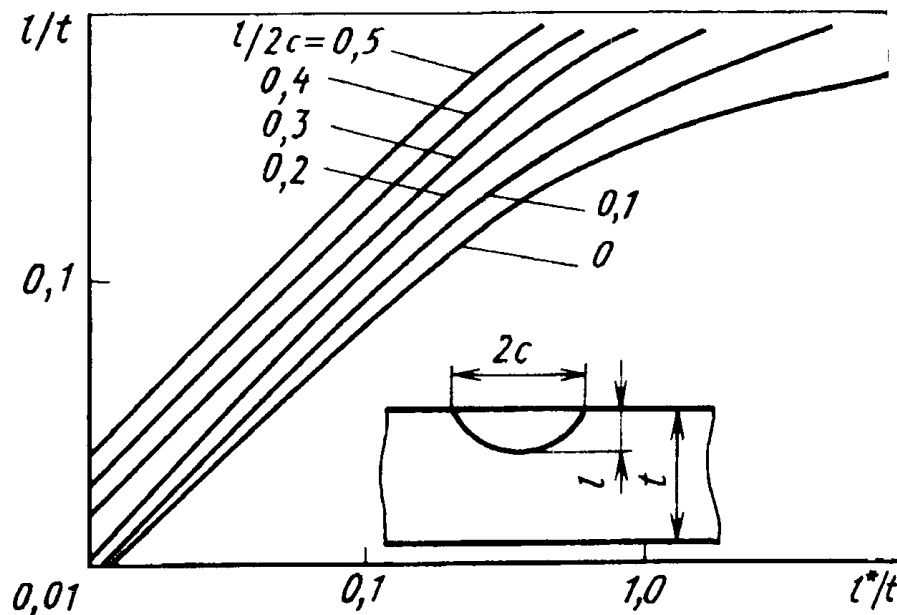


Рисунок 5.8 – Співвідношення між розмірами поверхневої тріщини й розмірами ℓ^* еквівалентної прохідної тріщини

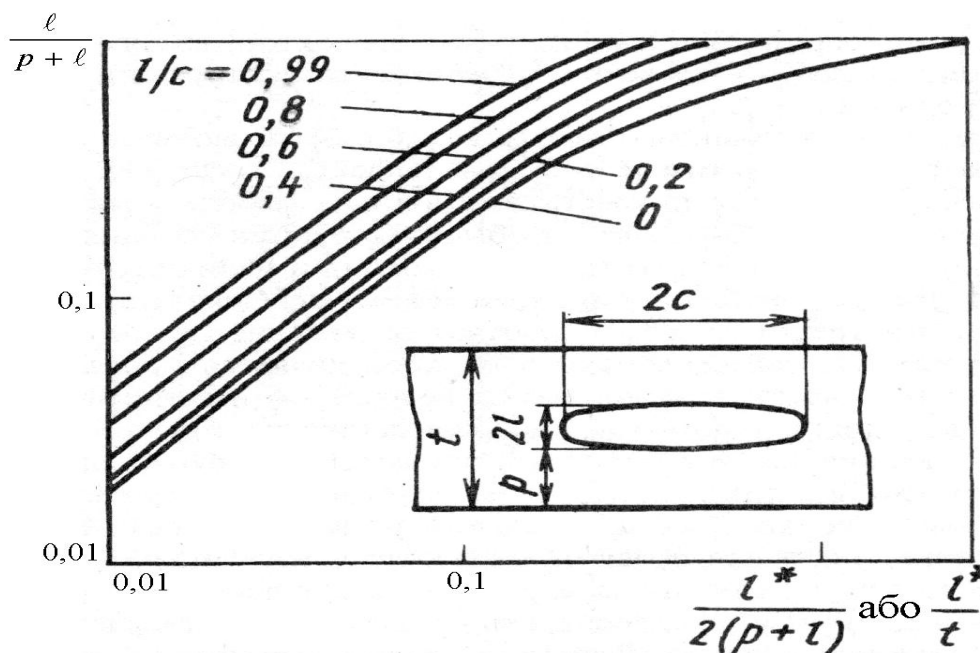


Рисунок 5.9 – Співвідношення між розміром внутрішньої тріщини й розміром l^* еквівалентної наскрізної тріщини

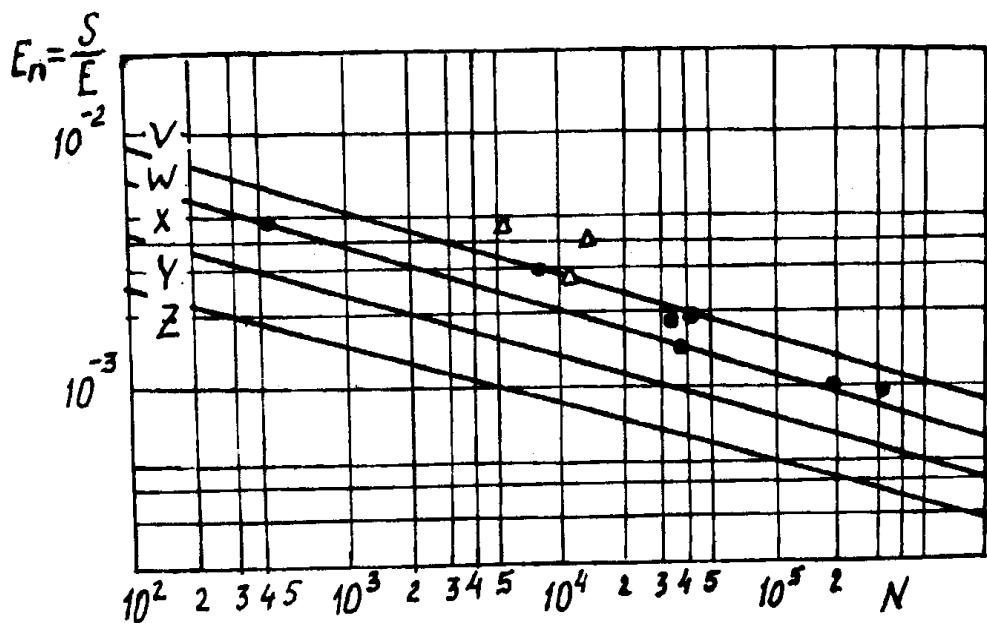
Для зварних конструкцій рекомендується брати значення σ_1 відповідно до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1– Рекомендації для призначення псевдопружного напруження σ_1

Розташування тріщини	Стан конструкції	σ_1
Удалині від концентрації напружень	Залишкові напруження зняті	$\sigma_{розр}$
	Після зварювання	$\sigma_{розр} + \sigma_{0,2}$
Поблизу концентратів напружень	Залишкові напруження зняті	$\alpha_\sigma \cdot \sigma_{розр}$
	Після зварювання	$\alpha_\sigma \cdot \sigma_{розр} + \sigma_{0,2}$

При цьому передбачається, що після зварювання залишкові напруження дорівнюють σ_T , а термообробка повністю їх усуває. Але ці рівняння використовуються тільки для визначення припустимих розмірів тріщиноподібних дефектів, маючи на увазі, що коефіцієнт запасу дорівнює приблизно 2 – 2,5.

Харрісоном (Британський інститут стандартів) [2] вплив дефектів на утомлену міцність зварних з'єднань низьколегованих конструкційних сталей з $\sigma_B = 440...460$ МПа й алюмінієвих сплавів запропоновано ще на стадії про-ектування конструкцію відносити до одного з п'яти класів: V, W, X, Y, Z, які відрізняються східчастим зниженням рівня вимог до якості виготовлення. Він обґрунтовував це тим, що відносно зварної конструкції, що працює при циклічних навантаженнях, не треба наполягати на ремонті дрібних внутрішніх дефектів, якщо поруч розташований кутовий шов, який визначає утомлену міцність даної конструкції. Кожному рівню якості відповідає своя область на діаграмі: рівень напруженості - число циклів до руйнування в логарифмічних координатах, де за показник рівня напруженості використана повна деформація ε_n , або відповідне їй умовне напруження $\sigma = \varepsilon_n E$ (рис.5.10).



Δ - 3 % - на пористість;

Δ^* - шлакові включення необмеженого протягу

Рисунок 5.10 – Діаграма категорій якості (залишкові напруження зняті)

Положення похилих паралельних прямих, що розділяють діаграму на п'ять областей, визначається за експериментальними даними для кожного рівня дефектності. Так, якщо всі експериментальні точки, які відповідають рівню пористості 3% лежать в області класу V, то рівень дефектності береться таким, що припустимий для класу W. Відповідно, якщо для шлако-

вих включень необмеженого протягу розташування експериментальних точок обмежено областю W, то такі дефекти вважаються припустимими для класу X.

Цим же інститутом випущений документ, що регламентує допустимі розміри дефектів у зварних конструкціях при утомлених навантаженнях. Усі дефекти розділяються на дві основні групи – плоскі й неплоскі. Для плоских дефектів категорію якості встановлюють за номограмами, що побудовані виходячи із закономірностей зросту утомленої тріщини на основі використання залежності Парренса. При цьому за критичний розмір тріщини рекомендується брати нижні граничні значення тріщиностійкості, які отримані при експериментальних випробуваннях. Для плоских дефектів методи оцінки їхньої небезпеки базуються на механіці руйнування, а для неплоских дефектів – на експериментальних даних. Установлено 11 категорій якості Q0-Q10 (рис. 5.11) для зварних з'єднань після зварювання й QS0- QS10, для них же у випадку зняття залишкових напружень (табл.5.2).

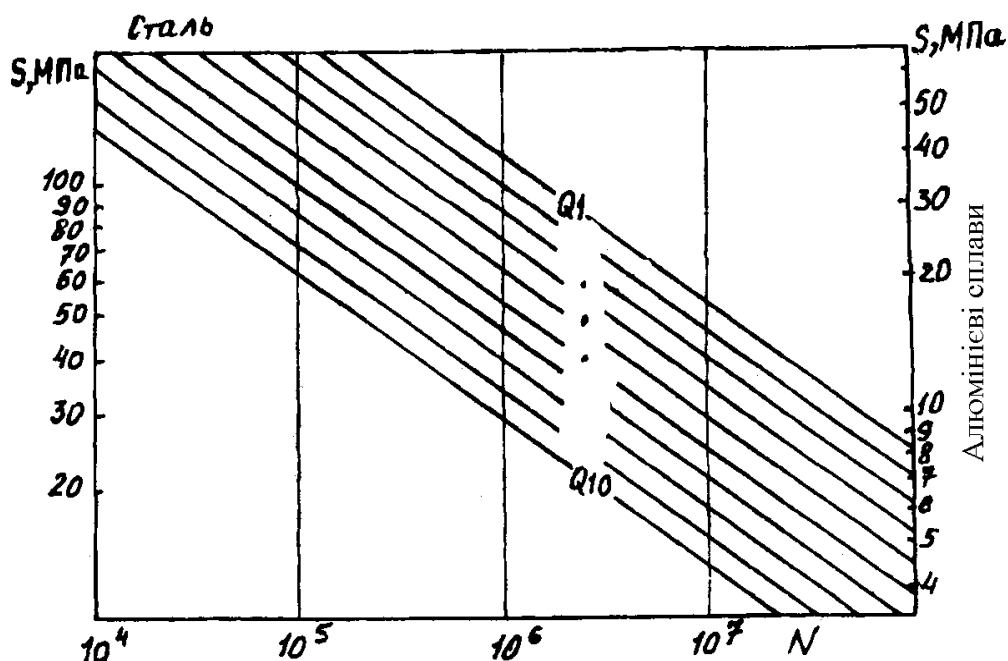


Рисунок 5.11 – Діаграми категорій якості для зварних з'єднань зі сталей і алюмінієвих сплавів

При визначенні необхідної категорії якості для конструкцій у стані після зварювання враховують тільки розмах напружень, звертаючи увагу, що напруження в межах циклу змінюються вниз від рівня залишкових напружень, взятих рівними межі текучості, тоді як для конструкцій зі знятими напруженнями, крім розмаху напружень необхідно враховувати й характеристику циклу, оскільки поширювати тріщину буде лише розтягуюча частина циклу.

Таблиця 5.2 – Категорії якості залежно від розмаху напружень

Категорія якості		Розмах напружень на базі 10^5 циклів, МПа	
Після зварювання	Залишкові напруження зняті	Сталь	Алюмінієві сплави
Q1	QS1	248	83
Q2	QS2	218	73
Q3	QS3	185	61
Q4	QS4	163	54
Q5	QS5	135	45
Q6	QS6	115	38
Q7	Q σ 7	100	33
Q8	QS8	85	28
Q9	QS9	73	24
Q10	QS10	63	21

Для конструкції, що навантажується розмахом напружень S , необхідна категорія якості повинна відповідати рядку таблиці з розмахом напружень вище S , або діаграмі категорій якості (рис.5.11), що зв'язує значення S з базовим числом навантажень.

Для неплоских дефектів категорію якості встановлюють залежно від розміру шлакового включення або відсотка пористості відповідно до таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Установлення потрібної категорії якості залежно від розміру дефекту

Категорія якості	Максимальний розмір шлакового включення, мм				Пористість поверхні за рентгенограмою,%
	Імовірність неруйнування %				
	97,5		99,5		
	Після зварювання	Після відпуску	Після зварювання	Після відпуску	
Q0/ S0	1,5	7,5	1,5	1,5	0
1	2,5	19	2.0	11	3
2	4	55	2.5	25	3
3	10	-	5	145	5
4	35	-	9	-	5
5	-	-	66	-	5
6...10	-	-	-	-	5

Якщо виявлений дефект відповідає, наприклад, категорії якості Q_3 , а категорія розглянутої конструкції Q_5 , то дефект вважається допустимим. Дані показують, що порівняно невелике збільшення розмаху напружень може викликати перехід від відсутності обмежень на розміри дефектів до необхідності усунення навіть дуже малих дефектів.

Японський стандарт (WES-2805) [3] призначений для оцінки критичності тріщиноподібного дефекту з позицій виключення крихкого руйнування. Характерні дефекти приводяться до еквівалентного розміру наскрізної тріщини a^* , подібно вище розглянутим (рис. 5.8, 5.9).

Умови навантаження характеризують псевдопружну деформацією в зоні розташування дефекта відповідно до вираження $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$; де ε_1 - від зовнішнього навантаження; ε_2 - від залишкових напружень; ε_3 - від конструктивної концентрації напружень.

Для підрахунку ε_1 використовують рівняння:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_t}{E} + \frac{\alpha_v \cdot \sigma_{виг}}{E}, \quad (5.11)$$

де σ_t – мембранне напруження;

$\sigma_{виг}$ – напруження від вигину;

E – модуль пружності;

α_v – коефіцієнт, що враховує тип дефекту відповідно до табл.5.4.

Значення ε_2 визначають залежно від межі текучості $\sigma_{0,2}$

$$\varepsilon_2 = \alpha_r \cdot \sigma_{0,2}, \quad (5.12)$$

де α_r – коефіцієнт, що враховує тип дефекту і його орієнтацію у зварному з'єднанні відповідно до таблиці 5.4

Таблиця 5.4 – Значення коефіцієнтів α_v і α_r

Тип дефекту		α_v	α_r , з'єднання			
			стикового		напускного	
			паралельно шву	перпендикулярно шву	паралельно шву	перпендикулярно шву
Наскрізний (прохідний)		0,5	0	0,6	0	0,6
Внутрішній		0,25	0	0,6	0	0,6
Поверхневий на стороні	розтягнутої	0,75	0,2	0,6	0,6	0,6
	стиснутої					

Значення ε_3 підраховують залежно від ε_1 за залежністю:

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_1(\alpha_\sigma - 1), \quad (5.13)$$

де α_σ – коефіцієнт концентрації напружень, характерний для розглянутого з'єднання. Потім залежно від еквівалентного розміру дефекту a^* і псевдопружної деформації ε визначають розкриття тріщини у вершині дефекту δ відповідно до вираження:

$$\delta = 3,5 \varepsilon \cdot a^* \quad (5.14)$$

Розглянутий дефект вважається неприпустимим, якщо $\delta > \delta_c$, де δ – COD, підрахований для даних умов, а δ_c – критичне значення COD, що визначається експериментально при температурі випробувань. Усі фактори, які визначають значення δ і δ_c розглядаються як випадкові величини. Наведені вище дані схематично представлені на рисунку 5.12.

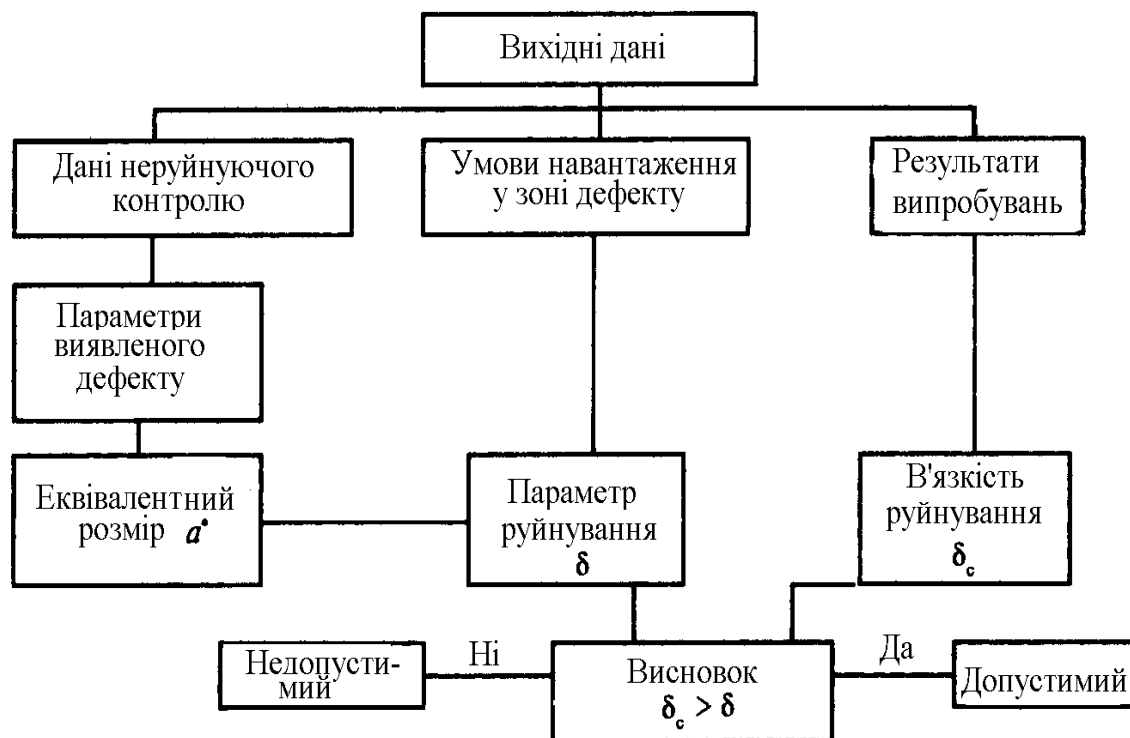


Рисунок 5.12 – Схема оцінки припустимого розміру плоского дефекту

При визначенні необхідної категорії якості для конструкцій у стані після зварювання враховують тільки розмах напружень, звертаючи увагу, що напруження в межах циклу змінюються вниз від рівня залишкових на-

пружень, взятих рівними межі текучості, тоді як для конструкцій зі знятими напруженнями, крім розмаху напружень необхідно враховувати й характеристику циклу, оскільки поширювати тріщину буде лише розтягуюча частина циклу.

На кожному етапі схеми (рис. 5.12) відхилення цих випадкових величин визначається низкою причин:

- на стадії неруйнуючого контролю обмежена визначенність дефекту залежно від технології контролю, помилки у визначенні розмірів і розташування дефекту, а також у розпізнаванні його характеру (одиничний, груповий);

- на стадії підрахунку еквівалентного розміру a^* — невизначеність оцінки гостроти й форми вихідного дефекту до еквівалентного розміру, а також погрішність в оцінці параметрів зміни навантаження в процесі експлуатації й розкид параметрів, що визначають закон розвитку утомленої тріщини;

- на стадії обліку умов навантаження в зоні дефекту ε — погрішності в оцінці зовнішніх навантажень і аналізі напружень залежно від значень коефіцієнтів $\alpha_b, \alpha_T, \alpha_\sigma$;

- на стадії оцінки параметра руйнування δ — невизначеність залежності $\delta = f(\varepsilon, a^*)$;

- на стадії оцінки в'язкості руйнування δ_c — розкид значень δ_c , одержуваних при випробуваннях і погрішності оцінки їхньої зміни від температури;

- на стадії висновку — з імовірних позицій висновок звичайно не одержує достатнього обґрунтування через відсутність необхідних даних за всіма перерахованими пунктами.

Питання оцінки критичності розмірів дефектів розроблені тільки для зварних з'єднань із конструкційних сталей. Але для цього випадку розробка імовірних підходів до оцінки допустимості дефекту перебуває ще в початковій стадії; не отримали необхідної розробки такі методичні питання, як облік стадії зародження тріщини від характерних типів дефектів, облік можливого появи граничного стану при $\delta < \delta_c$. Якщо у готовому виробу виявлений дефект, який за розміром виходить за межі норм, то виникає питання обґрунтованості його виправлення. Для вирішення подібних питань

необхідна розрахунково-експериментальна методика, яка б дозволяла оперативно оцінювати ймовірність порушення роботоздатності конкретного зварного з'єднання з дефектами в межах заданого ресурсу.

Основні положення цієї методики:

- втрата роботоздатності конструкції визначається появою того або іншого граничного стану. При змінних навантаженнях для перерізу з дефектом небезпека появи граничного стану зростає в міру збільшення розміру утомленої тріщини $\Delta \ell$ і при деякому $\ell_{кр}$ може наступити відмова. Таким чином забезпечення безвідмовної роботи вимагає дотримання нерівності:

$$\ell_0 + \Delta \ell < \ell_{кр}, \quad (5.15)$$

де ℓ_0 – вихідний розмір дефекту.

Таким чином, при оцінці роботоздатності зварного з'єднання або вузла, у якому неруйнівними методами контролю виявлений дефект, необхідно не тільки визначити розмір тріщини, здатної вирости від вихідного дефекту при експлуатації в межах заданого ресурсу, але й установити, чи не досягне вона того критичного розміру, який відповідає настанню граничного стану, неприпустимого для розглянутої конструкції.

5.8 Приклад і рішення [1]

Необхідно виготовити деталь у формі великого листа із хромонікель-молібденової сталі. Необхідно, щоб критичний розмір дефекту був більше 3 мм. Розрахунковий рівень напружень повинен становити половину від межі текучості σ_T . З метою економії маси листа було запропоновано збільшити σ_T від 1520 до 2070 МПа. Припустимо чи ні таке збільшення міцності? Умова – плоска деформація.

Рішення

Відповідь на це питання залежить від зміни коефіцієнта напружень K_{Ic} (в'язкості руйнування матеріалу) у залежності від σ_T . Проведені дослідження показали, що при значенні міцності $\sigma_T = 1520$ МПа величина K_{Ic} становила $66 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$, а при $\sigma_T = 2070$ МПа - K_{Ic} становив $33 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$. Для великого листа K_{Ic} визначається з формули

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi \ell},$$

де σ – розрахункове напруження, яке дорівнює $\sigma_T/2$;

ℓ – половина довжини дефекту.

Для сплаву з $\sigma_T = 1520$ МПа : $66 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2} = 760 (\pi/\ell)^{1/2}$, звідки:

$$\ell = \frac{66^2}{760^2 \cdot 3,14} = 0,0024 \text{ м} = 2,4 \text{ мм}.$$

Повна довжина дефекту буде дорівнювати $2\ell = 4,8 \text{ мм}$ і задовільняє вимогам конструктора, тому що вона перевищує необхідний малий розмір дефекту. Однак при рівності міцності $\sigma_T = 2070 \text{ МПа}$:

$$33 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2} = 1035 (\pi/\ell)^{1/2}, \text{ відкіля}$$

$$\ell = \frac{33^2}{1035^2 \cdot 3,14} = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,3 \text{ мм},$$

а повна довжина дефекту складе $2\ell = 0,6 \text{ мм}$, що в 5 разів нижче потрібного розміру (3мм) і в 8 разів менше припустимого розміру дефекту при значенні міцності $\sigma_T = 1520$ МПа. З наведеного випливає, що неможливо збільшення міцності сплаву до 2070МПа з одночасним зменшенням маси конструкції, тому що не задовольняється вимога до мінімального розміру дефекту. Крім того, при припустимому розмірі дефекту 4,8 мм при $\sigma_T = 1520 \text{ МПа}$ з переходом до $\sigma_T = 2070$ МПа необхідно знизити рівень розрахункових напружень з 1035 до 380 МПа, тобто:

$$\sigma = \frac{K_{1c}}{\sqrt{\pi a}} = \frac{33}{\sqrt{3,14 \cdot (0,0024)}} = 380 \text{ МПа}.$$

Таким чином, при однаковому розмірі дефекту 4,8 мм рівень допустимих напружень у більш міцному сплаві може становити тільки половину менш міцного сплаву, що вимагає дворазового збільшення маси деталі.

6 ВПЛИВ МЕХАНІЧНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ НА РОБОТОЗДАТНІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

6.1 М'які та тверді прошарки в зварних з'єднаннях

Зварне стикове з'єднання в поперечному перерізі має кілька ділянок, що можуть істотно розрізнятися між собою за механічними властивостями (рис. 6.1).



Рисунок 6.1 – Стикове зварне з'єднання

Це сам шов 1, навіколошовна зона 2, для якої у деяких сталей притаманні структурні перетворення і яка може мати підвищену або знижену твердість і міцність; зона високого відпуску 3, у якій у термічно оброблених сталях міцність і твердість знижені в результаті нагрівання при зварюванні. Зона 4, що нагрівається до більш низьких температур, і матеріал якої порізному змінює свої властивості в залежності від марки сталі або сплаву і попередньої термічної обробки.

Розбіжність механічних властивостей металу у різних ділянках у порівнянні з розмірами зварного з'єднання, головним чином з товщиною зварних елементів, називається механічною неоднорідністю.

При сталому режимі зварювання ширина зон та їхні механічні властивості мало змінюються за довжиною зварного з'єднання, тому звичайно розглядається неоднорідність властивостей і чергування зон у поперечному перерізі зварного з'єднання. Розрізняють м'які і тверді прошарки (рис. 6.2).

При зварюванні термічно оброблених сталей шов і навіколошовна зона, які нагріті до температури A_{c3} , у процесі охолодження гартуються і мають більш високу твердість і міцність, ніж основний метал. Цю ділянку називають твердим прошарком. Поруч з нею з обох сторін знаходяться ділянки високовідпаленого металу, які відносно основного металу і твердого прошарку мають знижену межу текучості. Ці зони утворюють два м'яких прошарки.

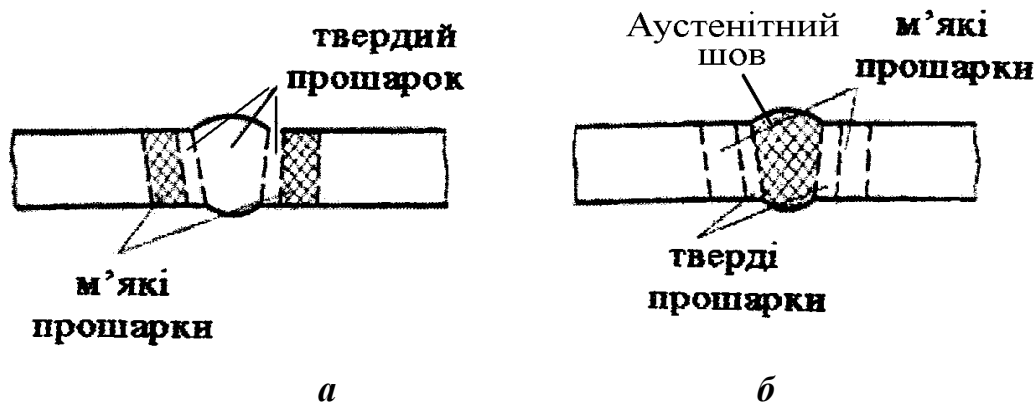


Рисунок 6.2 – Тверді і м'які прошарки в зварних з'єднаннях

Якщо термічно оброблена сталь зварюється аустенітним швом (рис.6.2,б), то виникає складне сполучення зон м'якого аустенітного шва, двох твердих і двох м'яких прошарків. Розподіл прошарків на м'які і тверді залежить від відношення межі текучості металу прошарку до межі текучості основного металу або металу примикаючого прошарку. Якщо відношення меж текучості прошарку і сусідньої ділянки більше одиниці, то прошарок буде твердий, у протилежному випадку – м'який.

6.2 Напружений стан і міцність м'якого прошарку при розтягуванні, вигині

Необхідність вивчення прошарків пояснюється тим, що механічні властивості зварних з'єднань, такі, як міцність, деформаційна здатність, енергоємність при руйнуванні, а також місце і характер руйнування, залежать від ступеня і топографії механічної неоднорідності.

Механічні властивості зразка, вирізаного з м'якого прошарку і який має низьку міцність, ще не свідчить про те, що зварне з'єднання в цілому має такі ж властивості. Взаємодія окремих зон з'єднання протікає складним способом, а міцність зварного з'єднання, як правило не збігається з міцністю якого-небудь прошарку. Розглянемо випадок, коли розтягуюча сила спрямована уздовж шва і всі прошарки одержують однакові деформації (рис.6.3) [1].

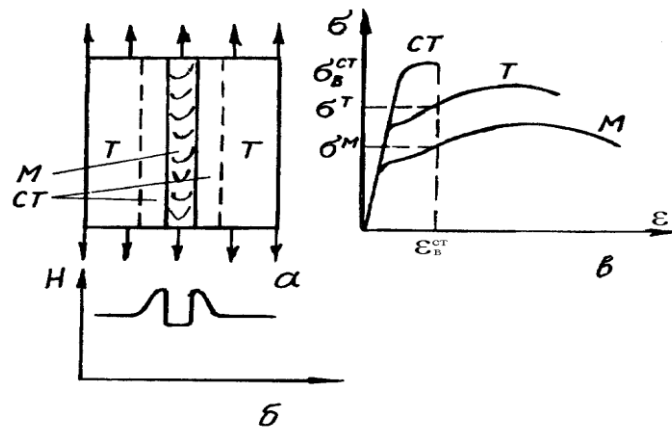
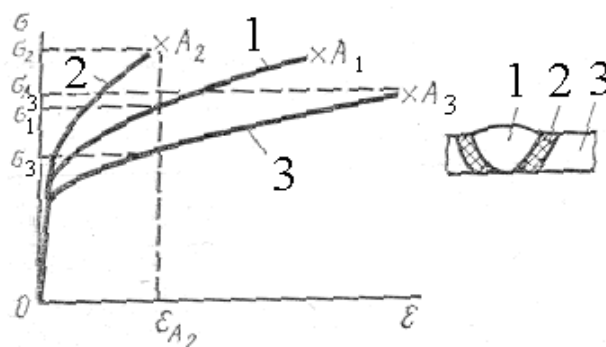


Рисунок 6.3 – Міцність елемента з подовжнім стиковим швом

У випадку повздовжнього розтягування стикового шва можна зробити припущення, що плоскі перетини зберігаються, а зони м'якого металу (М), більш твердої підгартованої ділянки термічного впливу (СТ) і твердого основного металу (Т), мають однакові деформації (рис.6.3,в). З діаграми розтягування σ - ϵ випливає, що спостерігається певний зріст умовних напружень у найбільш твердому металі (СТ) аж до рівня тимчасового опору σ_B . Таким чином, при розташуванні шва уздовж розтягуючого зусилля, знижена деформаційна здатність однієї з зон зварного з'єднання може знизити максимально можливу міцність у порівнянні з елементом без швів.

Деформаційна здатність з'єднання і його несуча здатність обмежені пластичністю металу найменш пластичного прошарку. Точки A_1 , A_2 , A_3 відповідають руйнуванню зразка, що наступить при $\epsilon = \epsilon_{A2}$ (рис.6.4) [9]. При цьому напруження σ_3 в основному металі, σ_1 у шві і σ_2 у твердому прошарку будуть сильно відрізнятися.



1 – шов; 2 – навколошовна зона (твердий прошарок); 3 – основний метал

Рисунок 6.4 – Діаграма залежності напруження σ від деформації ϵ для різних зон зварного з'єднання при розтягуванні уздовж шва

Поздовжня розтягальна сила в основному сприймається ділянкою основного металу, тому що його площа набагато перевершує і площу поперечного перерізу шва і площу твердого прошарку. І хоча рівень напружень σ_2 у твердому прошарку буде великий, середні напруження будуть близькі до σ_3 , які істотно нижче руйнівних напружень у точці A_3 . Це означає, що міцність зварного з'єднання з твердим прошарком, навантаженого уздовж шва, виявиться нижче, ніж міцність такого ж елемента з основного металу, тому що руйнування в останньому випадку відбудеться при напруженнях, близьких до $\sigma_3 < \sigma_{A3}$. Негативний вплив твердого прошарку позначається сильніше, якщо за довжиною з'єднання зустрічаються різкі зміни перетину шва, що викликають концентрацію напружень, або ще гірше – поперечні тріщини або інші дефекти у твердому прошарку.

При дії сили уздовж шва наявність маломіцних м'яких прошарків практично не впливає на загальну несучу здатність навантаженого елемента, тому що площа прошарків мала.

При поперечному розташуванні шва відносно розтягальної сили (рис.6.5) [9] вплив неоднорідності механічних властивостей виявляється інакше.

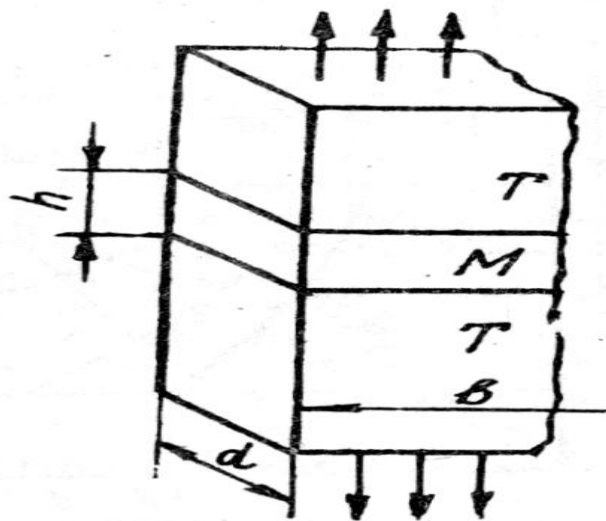


Рисунок 6.5 – Схема розташування шва поперек розтягального зусилля

Через розходження значень коефіцієнта Пуассона в пружній і пластичній областях ділянки більш міцного металу, що працюють у пружній області, перешкоджають розвитку пластичних деформацій у сусідньому м'якому прошарку. Стисненість деформацій м'якого прошарку визначає появу об'ємного напруженого стану і підвищення опору розвитку в ній пластич-

них деформацій. У результаті виникає ефект “контактного зміцнення” м'якого прошарку, який залежить від відносної товщини прошарку

$\chi = \frac{h}{d}$ і форми поперечного перетину елемента, де h – ширина м'якого прошарку; d – товщина металу.

Припускаючи, що матеріали м'якого прошарку (М) і основного металу (Т) ідеально пружнопластичні, і їхні межі текучості знаходяться у співвідношенні $\sigma_T^M < \sigma_T$, були отримані рішення про настання текучості прошарку у складі зварного з'єднання у залежності від розміру прошарку, форми поперечного перерізу і значення σ_T^M у вигляді :

$$\sigma'_T = \sigma_T^M K\chi, \quad (6.1)$$

де σ'_T – межа текучості зварного з'єднання;

$K\chi$ – коефіцієнт контактного зміцнення.

Оцінка міцності реального зварного з'єднання, яка враховує зміцнення м'якого прошарку в результаті пластичної деформації, здійснюється підстановкою в цю формулу межі міцності σ_B^M замість σ_T^M .

На рисунку 6.6 [] показана залежність максимально можливої міцності зварного з'єднання з м'яким прошарком від його відносної товщини χ для елементів з різним ступенем компактності перетину відповідно до вираження:

$$\sigma'_B = \sigma_B^M K\chi. \quad (6.2)$$

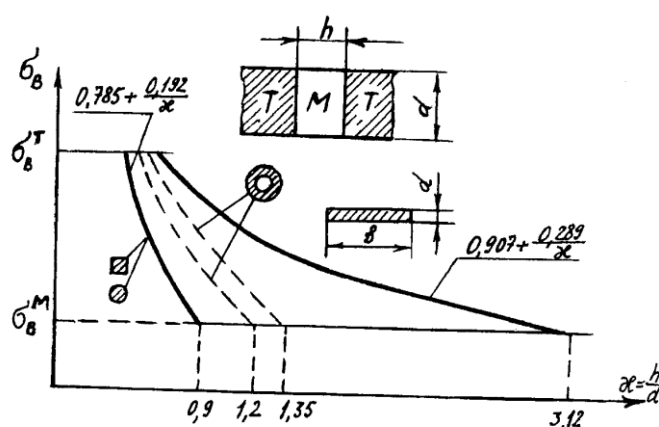


Рисунок 6.6 – Залежність максимально можливої міцності стикового з'єднання від відносної товщини м'якого прошарку χ і форми поперечного перерізу []

З рисунка 6.6 видно, що зі зменшенням відносної товщини м'якого прошарку χ ефект контактного зміцнення підсилюється, і при деякому його значенні забезпечується можливість досягнення міцності основного металу. Однак досягнення повного зміцнення ускладнюється тим, що схема напруженого стану ділянок твердого металу поблизу прошарку виявляється значно більш м'якою в порівнянні з тривісним розтягуванням м'якого прошарку, і вони вступають у пластичну деформацію, у той час як віддалений від прошарку метал працює ще пружно. Таке зм'якшення металу в приконтатній області зменшує стримування деформацій м'якого прошарку, послабляючи ефект зміцнення. У цьому випадку контактне зміцнення реалізується не цілком, тому у вираз (6.2) вводиться коефіцієнт реалізації контактного зміцнення $K_p \leq 1$:

$$\sigma'_B = \sigma_B^M K_\chi \cdot K_p. \quad (6.3)$$

6.3 Контактне зміцнення

У пружній стадії навантаження м'який прошарок і сусідні ділянки деформуються однаково і при досягненні межі текучості матеріалу м'якого прошарку σ_T^M у нього виникає пластична деформація, у той час як сусідні ділянки залишаються в пружному стані. При подальшому підвищенні навантаження і деформації коефіцієнт поперечної деформації μ в прошарку буде вище, ніж у сусіднього металу.

У міру розвитку пластичної деформації в прошарку $\mu \rightarrow 0,5$, у той час як у пружних частинах $\mu = 0,3$. Через неоднакову поперечну деформацію виникають дотичні напруження, максимальні на площинах розтягування. Вони будуть перешкоджати поперечному звуженню прошарку в напрямку товщини листа. Чим вужче прошарок, тобто чим менше $\chi = h/d$, тим менше поперечне звуження одержує прошарок до моменту виникнення у ньому середніх істинних руйнівних напружень σ_p . Так як середнє істинне руйнівне напруження σ_p змінюється мало, то в більш вузьких м'яких прошарках площа утоншеного поперечного перерізу прошарку F_y до моменту руйнування буде більше, отже буде більшою і руйнівна сила, P_p :

$$P_p = \sigma_p F_y. \quad (6.4)$$

У цьому полягає ефект контактного зміцнення. Але підвищення P_p не може відбуватися безмежно, тому що сусідні з м'яким прошарком більш мі-

чні ділянки також за певних умов почнуть пластично деформуватися. Чим більш міцні сусідні зони, тим більше ефект контактного зміцнення. Тверді прошарки, що знаходяться поруч з м'якими, підсилюють цей ефект. Можна розглядати ідеалізований випадок роботи м'якого прошарку, вважаючи сусідні з прошарком ділянки металу абсолютно твердими, не здатними до деформування, тобто буде виконуватися умова плоскої деформації. У цьому випадку тимчасовий опір зварного з'єднання з м'яким прошарком σ'_B можна визначити за формулою (6.2), де K_χ – коефіцієнт контактної зміцнення у випадку плоскої деформації [9]:

$$K_\chi = (\pi + 1/\chi)/(2\sqrt{3}). \quad (6.5)$$

Якщо прошарок не ідеально прямокутний, як це буває в зварних з'єднаннях, то

$$\chi = F/d^2, \quad (6.6)$$

де F – площа поперечного перерізу прошарку.

Міцність зварного з'єднання досягне міцності сусіднього, більш міцного металу, якщо тимчасовий опір σ_B стане дорівнювати σ_B^T більш міцного металу. При цьому:

$$K_{\chi_{gr}} = \sigma_B^T / \sigma_B^M. \quad (6.7)$$

Визначимо граничну відносну товщину прошарку χ_{gr} , при якій досягається рівномірність зварного з'єднання:

$$\chi_{gr} = 1/(2\sqrt{3} K_{\chi_{gr}} - \pi). \quad (6.8)$$

Наприклад, якщо $\sigma_B^T / \sigma_B^M = 1,2$, то за формулою (6.8) одержуємо $\chi_{gr} = 1$. При $K_{\chi_{gr}} > 1,2$ відносна товщина м'якого прошарку χ_{gr} повинна бути ще менше. Однак підвищення міцності зварного з'єднання з м'яким прошарком за рахунок зменшення χ обмежено рівнем істинного руйнівального напруження металу м'якого прошарку.

З рис. 6.7 [9] видно, що в широких прошарках, коли ефект контактної зміцнення ще не спостерігається, відносне звуження Ψ залишається постійним при зменшенні χ , а відносне подовження Δ поступово падає в міру зменшення частки довжини ділянки м'якого прошарку в загальній довжині зразка.

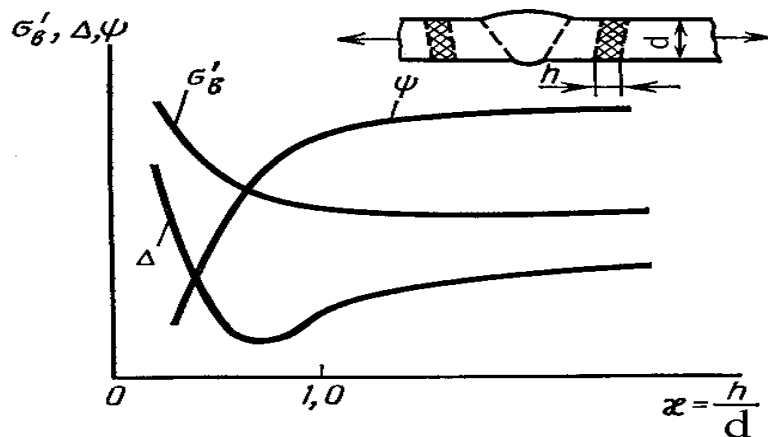


Рисунок 6.7 – Залежність σ_σ , Ψ і Δ від відносної товщини

$$\text{прошарку} \quad \chi = \frac{h}{d}$$

В області контактного зміцнення Ψ різко падає, тому що зростають поперечні дотичні напруження, які перешкоджають звуженню прошарків. Подовження зразка Δ при зменшенні χ також спочатку зменшується, але потім, коли реалізується підвищення міцності, Δ зростає, оскільки в пластичну деформацію в більшій мірі утягується основний метал.

При випробуванні зварних з'єднань з м'яким прошарком на руйнування вигином руйнівний момент M_p , при якому з'являються тріщини в прошарку, не залежить від відносної товщини χ прошарку (рис. 6.8). Це обумовлено тим, що руйнування при вигину не пов'язане з утворенням шийки і зміною розмірів поперечного перерізу. Тому дотичні напруження, які діють поблизу границь м'якого прошарку, хоча і впливають на процес пластичної деформації під час навантаження, але не змінюють істотно товщину зразка і його момент опору.

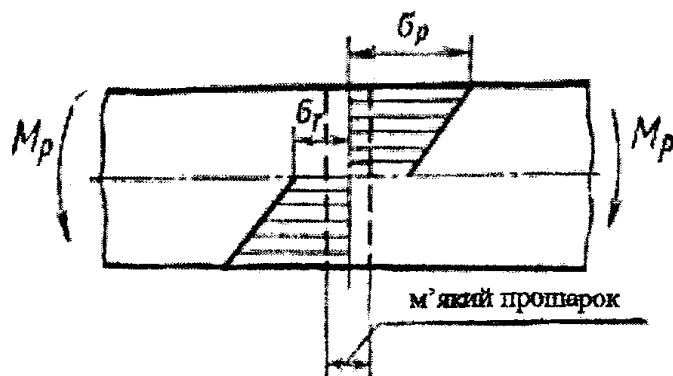


Рисунок 6.8 – Схематичний розподіл напружень при вигину полоси з м'яким прошарком

Руйнування настає, якщо максимальне напруження в крайньому волокні досягає істинного руйнівного напруження металу м'якого прошарку σ_p . Якщо припустити, що залежність напруження σ від деформації ϵ при $\sigma > \sigma_T$ має лінійний характер і до моменту руйнування епюра напружень у перетині виглядає, як показано на рис. 6.8, то руйнівний момент дорівнює:

$$M_p = W (\sigma_p + 0,5\sigma_T), \quad (6.9)$$

де W – момент опору перетину;

σ_T – межа текучості металу м'якого прошарку.

6.4 Робота подовжнього і кільцевого шва в циліндричній посудині тиску

Вплив м'яких і твердих прошарків на міцність залежить від того, до складу якого шва (кільцевого або подовжнього) вони входять. Якщо $\chi = h/d$ мала, де h – ширина м'якого прошарку, а d – товщина посудини, то м'який прошарок у її кільцевому шві працює аналогічно зварному з'єднанню, що розтягується уздовж прошарку. Зниження міцності прошарку не виявляється, тому що руйнування відбувається уздовж посудини. Якщо h/d зростає, то м'який прошарок подовжується в окружному напрямку значніше ніж інша частина посудини, у результаті чого виникає скривлення прямолінійної твірної, яке показано на рисунку 6.9.

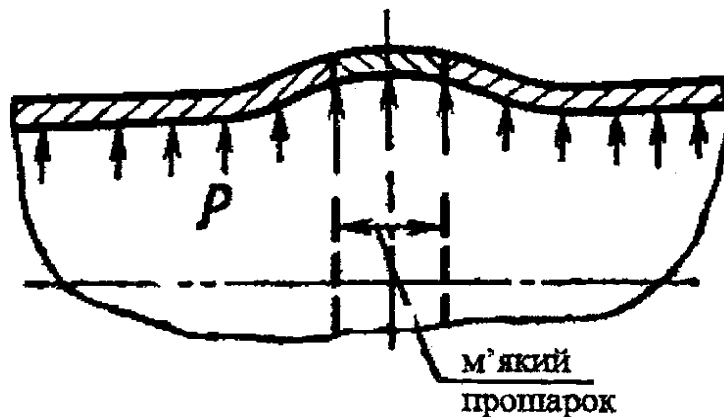


Рисунок 6.9 – М'який широкий прошарок у кільцевому шві циліндричної посудини, що знаходиться під внутрішнім тиском P

Унаслідок цього з'являються рівномірні вісьові деформації, і руйнування може наступити уздовж м'якого прошарку, тобто по колу посудини. Тверді зі зниженою пластичністю прошарки в кільцевому зварному з'єднанні руйнуються раніш, ніж інша частина посудини досягне граничної пластичної деформації в окружному напрямку. Цей випадок аналогічний розтягуванню зварного з'єднання уздовж вісі шва при наявності в ньому твердого прошарку. Момент настання руйнування залежить від пластичності твердого прошарку. М'який прошарок у подовжньому шві поводить себе приблизно так само, як при випробуванні зразків на одновісьове розтягування з поперечним м'яким прошарком (див.рис.6.5). Зріст ширини прошарку веде до зниження міцності, як і при одновісьовому розтягуванні. Тверді прошарки в подовжніх швах посудини, що не попадають у зону концентрації напружень, звичайно не створюють яких-небудь значних негативних явищ.

При двовісному розтягуванні в посудинах метал має можливість пластично деформуватися тільки за рахунок зменшення у напрямку товщини. Через великий опір пластичної деформації міцність при такій схемі навантаження помітно зростає. Це обумовлено тим, що до визначеного рівня напруження стоншення металу вкрай незначне, тому добуток напруження на площу у випадку циліндра дає [9]:

$$\sigma F_{\text{двовісне}} > \sigma F_{\text{одновісне}},$$

де $F_{\text{двовісне}}$ і $F_{\text{одновісне}}$ — площі поперечного перерізу металу зразка при двовісному й одновісному розтягуванні.

У зварних з'єднань прошарки можуть знаходитися під кутом до напрямку дії сил, мати довільну форму поперечного перерізу й інакше впливати на міцність. Проте, загальна тенденція їхнього впливу виявляється такою ж, як у випадках, розглянутих вище.

6.5 Вплив обробки металу і анізотропії на пластичну деформацію і міцність при двовісному розтягуванні

В'язкість і пластичність матеріалів в значній мірі залежить від розміру кристалічного зерна, характеру обробки, результатом якої є змінення в макроструктурі зерна. Теоритичні розробки Хола і Петча показують, що механічні властивості сталі зворотно пропорційні кореню квадратному із розміру кристалічного зерна, які підтверджені випробуваннями. Необхідно підкреслити, що якщо розмір кристалічного зерна змінюється за рахунок ная-

вності домішок, то відповідна зміна властивостей буде іншою ніж у випадку коли розмір кристалічного зерна змінюється за рахунок зміни часу і температури рекристалізації. Типовим прикладом неоднорідного температурного процесу є процес нагрівання і охолодження зварного шва. Сегрегація лиття зберігається і при наступній обробці, внаслідок чого можуть виникнути місцеві структурні змінення. Спеціальна структурна неоднорідність виникає у поковках або в прокаті, у яких направлення зерен та їх розмір можуть суттєво змінюватися від точки до точки. Головною задачею обліку анізотропних властивостей є анізотропія, яка є наслідком деформації матеріалів. Деформування в горячому або у холодному стані може привести до побудови кристалографічних вісей кристалічних зерен у визначеному напрямку. Воно також може стати причиною утворення волокон: подовжніх кристалічних зерен або груп подовжніх включень. Обробка також може визвати утворення внутрішніх напружень.

Одним з видів неоднорідності механічних властивостей листового металу є (табл.6.1) [9]. Різними можуть бути пластичність, міцність, ударна в'язкість, коефіцієнт поперечної деформації, модуль пружності й інші властивості.

Таблиця 6.1 – Механічні властивості прокату у різних напрямках [9]

Марка сталі	Поперек прокату			За товщиною		
	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %
09Г2С	360	40	75	381	33	40
Ст.3пс	240	32	64	242	7	13
16Г2АФ	425	20	60	445	5	-

Анізотропія, яка виникла за рахунок кристалографічної текстури, особливо важлива для крихкого руйнування, тому що скол утворюється на найбільш вигідних кристалографічних площинах. Матеріали, які мають обмежену можливість для просковзування зерен з щільноупакованою гексагональною кристалічною решіткою проявляють крихкі властивості. Утворення волокон важливо для матеріалів усіх видів. Цей процес є основною причиною різниць у міцності, пластичності і в'язкості руйнування визначе-

них у зразках, які орієнтовані вздовж волокон і поперек їх напрямку при обробці.

На рисунку 6.10 [1] показані різні можливості розповсюдження тріщини у товстому листі, отриманому прокаткою. Зразки, які орієнтовані в короткому поперечному напрямку (зріст тріщини у напрямку L і T), мають особливо низьку в'язкість руйнування. Зміна в'язкості руйнування для різних напрям-ків розповсюдження тріщини може бути дуже великою. Так, для легованої сталі з 18%-м вмістом нікеля в'язкість руйнування подовжніх зразків вдвічі перевищує в'язкість руйнування зразків орієнтованих в короткому поперечному напрямку.

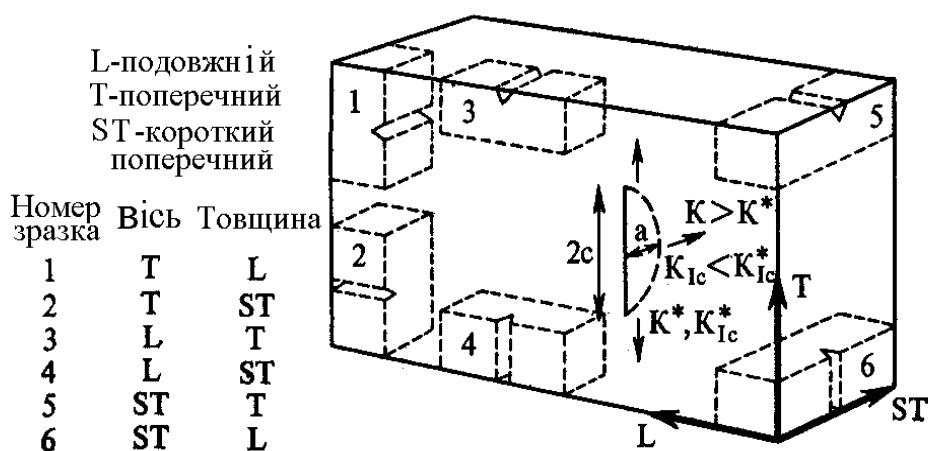
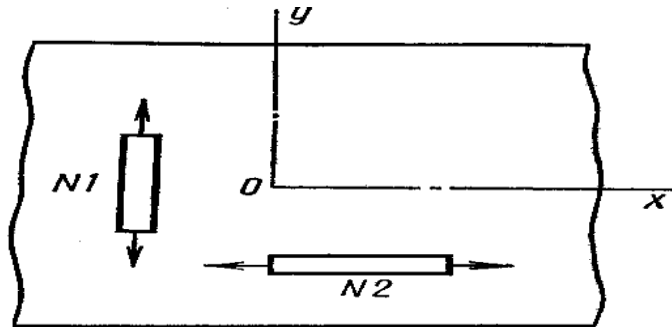


Рисунок 6.10 – Напрямок зросту тріщини у пластині, отриманій прокаткою

Площини руйнування, які паралельні напрямку течії зерен, мають найменший опір зросту тріщин. При цьому у випадку утворення еліптичної раковини найбільша інтенсивність напружень K_{Ic} виникає на кінці малої вісі, тобто у точці найбільшого віддалення фронту тріщини від поверхні зразка. Руйнування відбувається тоді, коли максимальна інтенсивність напружень K_{Ic} буде вище величини в'язкості руйнування. Зріст тріщини на кінці малої вісі повинен відбуватись у напрямку найменшої в'язкості руйнування, тому що при цьому забезпечується не тільки максимум інтенсивності напружень у даному місці, а також і мінімум в'язкості руйнування. У випадку раковини з малим ексцентриситетом тріщина буде в основному поширюватися в напрямку товщини, зміна інтенсивності напружень K вздовж цієї частини фронту тріщини буде відносно малою, а максимальна

інтенсивність напружень при руйнуванні буде близька до величини K_{1c} , тобто інтенсивність напружень при руйнуванні буде залежити від її форми.

Міцність, пластичність, ударна в'язкість вищі в зразках, вирізаних уздовж прокату (рис.6.11).



№ 1 – поперек прокату; № 2 – уздовж прокату

Рисунок 6.11 – Схема розташування зразків

Під час руйнування тріщина, перетинаючи волокна, зустрічає більший опір, ніж рухаючись уздовж волокон. Особливо низькими бувають міцність і пластичність металу за товщиною листа. При наявності розшарувань у металі пластичність окремих зразків у цьому напрямку близька до нуля. Під час термічного різання або зварювання, якщо усадка металу відбувається в напрямку товщини листа, у зоні розшарувань з'являються тріщини.

Анізотропія може виражатися в різній опірності металу пластичній деформації, різному зміцненні і, як наслідок, у різних коефіцієнтах поперечної деформації (N або R). У даному випадку анізотропія оцінюється за відношенням поперечних пластичних деформацій з виражень [9]:

$$N = \frac{\varepsilon_{x_{nl}}}{\varepsilon_{z_{nl}}''} \quad \text{і} \quad R = \frac{\varepsilon_{y_{nl}}}{\varepsilon_{z_{nl}}'}, \quad (6.10)$$

де $\varepsilon_{x_{пл}}$ і $\varepsilon_{z_{nl}}''$ поперечні пластичні деформації при розтягуванні зразка № 1 відповідно у напрямку довжини і товщини прокату (рис.6.11);

$\varepsilon_{y_{пл}}$ і $\varepsilon_{z_{nl}}'$ – те ж при розтягуванні зразка № 2 (рис. 6.11).

Стрілками указаний напрямок дії зусилля при випробуваннях на розтягування.

Якщо матеріал ізотропний у всіх трьох напрямках, то $N = R = 1$. Якщо матеріал ізотропний у площині, але анізотропний у напрямку товщини, то $N = R \neq 1$. У більшості катаних металів $N > R$, тобто деформація в напрямку прокату протікає більш легко, ніж у поперечному напрямку. Рівномірне подовження (до утворення шийки) у подовжньому напрямку прокату звичайно більше, ніж у поперечному.

Зниження механічних властивостей за товщиною металу пояснюється таким чином. У процесі виплавки сталі шкідливі домішки (особливо сірка) зв'язуються марганцем у з'єднання MnS і утворюють включення в злитках при їхній кристалізації. Але в злитках вони знаходяться у вигляді округлих включень, які практично не впливають на їх міцність. При прокатці ж округлі включення перетворюються в плоскі прошарки, що стають небезпечними концентраторами. Якщо при прокатці виникла тріщина, то при русі на її кінці утвориться поле об'ємних напружень. Два напрямки розкривають її, а третій (перед кінцем тріщини) розриває метал у напрямку, перпендикулярному руху тріщини. Тому при навантаженні листа в напрямку товщини прошарку, тріщини будуть розкриватися і сприяти руйнуванню. При навантаженні в площині листа, прошарки будуть гальмувати рух тріщини. Отже, з'являється небезпека утворення тріщин під дією залишкових і невеликих робочих напружень, перпендикулярних до площини листа.

7 ВПЛИВ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР НА МІЦНІСТЬ І ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

7.1 Зміна властивостей металів при зниженні температури

Про зміну властивостей металів при зниженні температури звичайно судять, орієнтуючись на їхні властивості при кімнатних температурах (18...20°C). Необхідно розрізняти властивості металів, які установлені на гладких зразках при статичному навантаженні (межа текучості $\sigma_{0,2}$, (межа міцності σ_B , дійсне руйнівне напруження σ_R , відносне подовження δ , поперечне звуження ψ) і властивості металів при випробуванні зразків з надрізами при статичному або ударному навантаженні.

У переважної більшості металів при зниженні температури σ_B , σ_T і H_B (твердість) збільшуються і, здавалося б, що можна призначати більш ви-

сокі допустимі напруження і зменшити металоємність конструкцій. Але це вдається зробити рідко, тому що багато конструкцій експлуатуються як при низьких, так і при підвищених температурах, що змушує орієнтуватися на більш низькі значення σ_T і σ_B . Крім того, майже у всіх деталях і конструкціях має місце концентрація напружень, а при зниженні температури чутливість багатьох металів до них різко зростає, то на перший план виступає опірність крихким руйнуванням. Але в криогенній техніці, коли максимальні робочі навантаження діють тільки при низьких температурах, а метал при цьому нечутливий до концентрації напружень, удається підвищувати допустимі напруження.

Характер зміни властивостей металів при зниженні температури залежить від багатьох факторів – виду кристалічних решіток, хімічного складу, величини зерна, термічної обробки – і виявляється по-різному в залежності від умов навантаження і напруженого стану.

Зміна σ_B , $\sigma_{0,2}$ і δ різних металів показана на рисунку 7.1. .

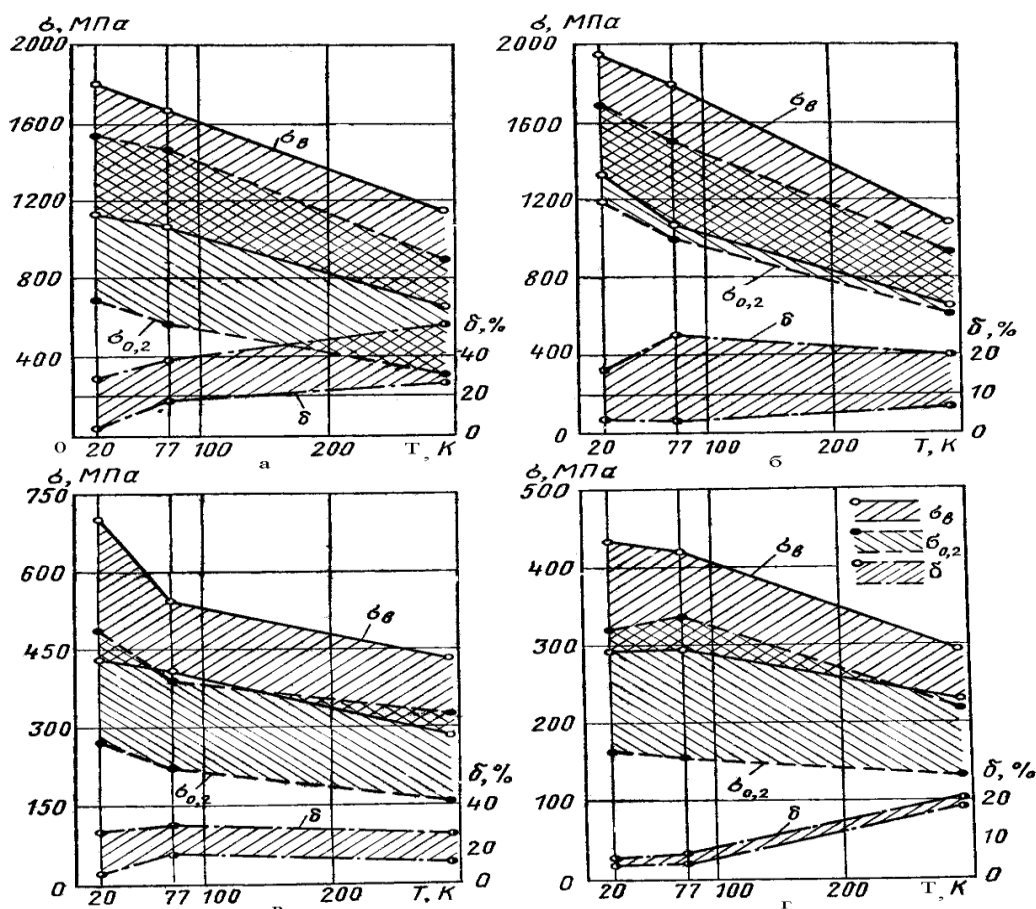
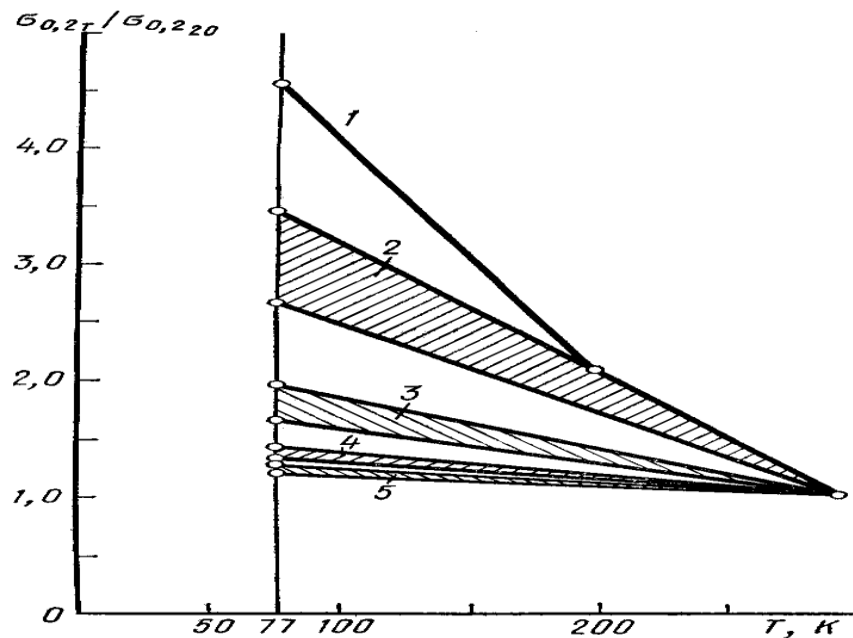


Рисунок 7.1 – Міцність і пластичність при низьких температурах корозійностійких сталей (а); титанових (б); алюмінієвих (в) і магнієвих (г) сплавів [2]

Найбільш сильні зміни σ_B і $\sigma_{0,2}$ характерні для корозійностійких сталей і титанових сплавів. У металів і сплавів із гранецентрованою кубічною решіткою (γ_{Fe} , Al, Cu, Au, Ag, Ni) зі зниженням температури межа текучості в порівнянні з межею міцності підвищується незначно і вони відносяться до холодостійких. Пластичність і ударна в'язкість у них майже не змінюються.

У металів і сплавів з об'ємноцентрованою кубічною решіткою (α_{Fe} , Cr, Mo, Ta, Nb, W) межа текучості підвищується більш значно, ніж межа міцності, пластичність помітно знижується, і вони відносяться до холодноломких.

Зміна межі текучості в сталях залежить від її рівня при кімнатних температурах. Чим нижче межа текучості при 20°C, тим сильніше вона змінюється при зниженні температури (рис.7.2) [2].



$$\begin{aligned}
 1 - \sigma_{0,2}^{20} &\leq 200 \text{ МПа}; \quad 2 - \sigma_{0,2}^{20} = 250 \dots 400 \text{ МПа}; \\
 3 - \sigma_{0,2}^{20} &= 600 \dots 700 \text{ МПа}; \quad 4 - \sigma_{0,2}^{20} = 1000 \dots 1200 \text{ МПа}; \\
 5 - \sigma_{0,2}^{20} &= 1400 \dots 1800 \text{ МПа}
 \end{aligned}$$

Рисунок 7.2 – Залежність $\sigma_{0,2} / \sigma_{0,2}^{20}$ від температури

Особливості в зміні властивостей металів при зниженні температури:

- пластичність звичайно зменшується. Більш різко – у вуглецевих конструкційних сталях і низьколегованих, слабкіше – в інших металів. У ряді

алюмінієвих і мідних сплавів у деяких випадках відбувається збільшення пластичності (табл.7.1) [2];

- опір утомі при перемінних навантаженнях у більшості металів зростає;

- чутливість до концентрації напружень при гострих надрізах зростає, а ударна в'язкість (робота руйнування) зменшується найбільше помітно у вуглецевих і низьколегованих сталей невисокої міцності, що мають різко виражену область переходу від в'язкого до крихкого руйнування.

Таблиця 7.1 – Механічні властивості металів при різних температурах [9]

Метал	Межа текучості, МПа		Відносне подовження, %	
	+20°C	-70°C	+20°C	-70°C
Сталь 25 (нормалізація з 900°C)	290	440	29	25
Аустенітна сталь Х18Н9Т (загартування з 1050°C у воду)	250	280	42	37
Алюмінієвий сплав АМг-5 (відпалений)	170	180	21	24
Титановий сплав ОТ-4 (відпалений)	640	800	13	13

7.2 Методи оцінки властивостей металів при зміні температури

Усі властивості матеріалів залежать від температури. Також від неї суттєво залежить і в'язкість руйнування. При розгляді впливу температури на властивості металів необхідно звертати увагу також і на інші параметри, наприклад, на товщину. Відносно тонка пластина може знаходитись у плоскому напруженому стані і при кімнатній температурі мати високі значення в'язкості. При низьких температурах метал має більш високу межу текучості, і в пластині утворюється зона пластичності менших розмірів. У цьому випадку напружено-деформований стан можна характеризувати як перехідний, або як плоско деформований стан з більш низьким значенням в'язкості. Таким чином, температура впливає на в'язкість не тільки безпосередньо, але і побічно через температурну залежність межі текучості.

Висока роботоздатність багатьох деталей машин, зварних з'єднань і елементів зварних конструкцій при знижених температурах вирішальним чином залежить від їхньої здатності до опору крихким руйнуванням. Однак необхідно пам'ятати, що для багатьох матеріалів навіть кімнатні температури можуть бути областю їхнього крихкого поведіння і лише при підвищених температурах руйнування стають в'язкими. Поняття крихкого руйнування пов'язується з енергоємністю поширення руйнування, тобто з глибиною зони пластичних деформацій, що виникає при проходженні тріщини і значенням пластичної деформації у поверхні руйнування. При значній пластичній деформації, що виникає як на поверхні, так і в глибині, поверхня руйнування волокниста, а при відсутності пластичної деформації, або вкрай малому її значенні поверхня зламу кристалічна.

До в'язких руйнувань відносять такі, поверхня яких має цілком волокнистий злам. До крихких руйнувань відносять руйнування з кристалічною поверхнею зламу. Проміжне положення займають квазікрихкі руйнування, у яких частина поверхні має кристалічний, а частина – волокнистий злам. Зниження температури, збільшення швидкості навантаження, збільшення концентрації напружень сприяють переходу від в'язких форм руйнування до крихких.

Найбільш розповсюдженим і простим методом оцінки зміни властивостей при зниженні температури є випробування на ударну в'язкість, при якому виявляється як абсолютний рівень ударної роботи руйнування KCU , KCV (a_H), яка сильно залежить як від типу і гостроти надрізу, так і від характеру руйнування – в'язкого або крихкого (рис.7.3) [9].

Чим гостріший надріз, крупніше зерно, більші розміри зразка і вище швидкість навантаження, тим правіше і нижче розташована крива a_H . Також зміщується і крива волокнистості зламу (B). Заведено визначати першу критичну температуру $T_{кр.1}$, при якій площа волокнистого зламу складає 50%.

Для деталей, у яких можлива присутність тріщин або інших тріщиноподібних дефектів, проводять серіальні випробування (визначення властивостей металу або зварних з'єднань у деякому інтервалі зміни якого-небудь параметру з досить дрібним кроком його зміни); серіальні температурні випробування зразків металу проводять звичайно з кроком $\Delta T = 5 - 15$ К при визначенні $k_{1C}(k)$; $G_{1C}(G)$ або $\delta_c(\delta)$. Характер зміни кривих k_{1C} , G_{1C} і δ_c

подібний до кривої a_H (рис.7.3). За отриманими даними судять про безпечні рівні напружень і області температур експлуатації.

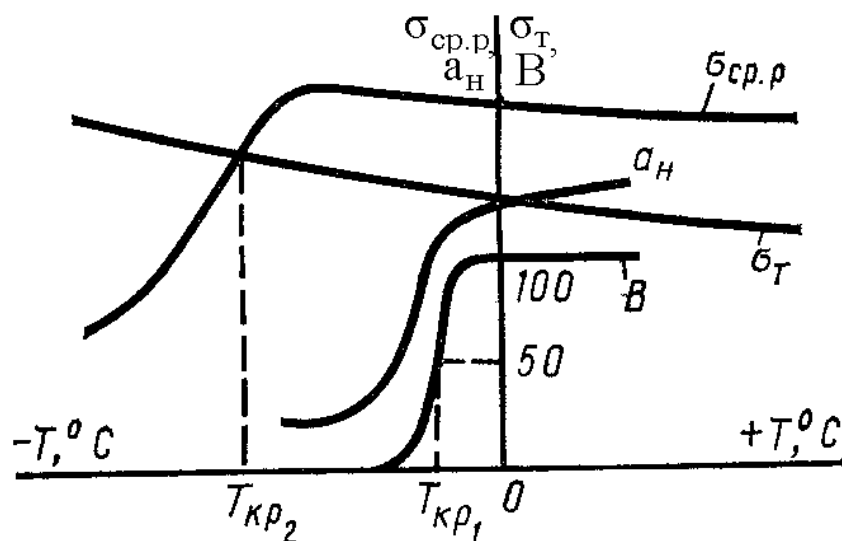


Рисунок 7.3 – Характер зміни площі з волокнистим зломом B (відсотки), роботи руйнування $KCU, KCV (a_H)$, межі текучості σ_m і середнього руйнівного напруження $\sigma_{cp.p}$ у залежності від температури випробувань для низькоміцних сталей

Для деяких деталей і вузлів шляхом випробування може бути визначена друга критична температура $T_{кр.2}$, при якій середнє руйнівне напруження $\sigma_{cp.p}$ стає рівним межі текучості металу при цій температурі. Величина $T_{кр.2}$ може бути різною в залежності від коефіцієнта концентрації напружень у деталі, характеру додаткових навантажень, середовища, наявності власних напружень. Руйнування при $\sigma_{cp.p} \leq \sigma_T$ може відбутися в межах крихкої зони при температурі, коли тріщина в основному металі може поширюватися далі, тільки як в'язка. При можливості поширення тріщини у металі на значні відстані (наприклад трубопроводи, корпуси кораблів) визначають питому роботу динамічного (швидкого) поширення тріщини G_{cd} у листовому металі. При цьому використовують великі зразки, що надає можливість у вістрі тріщини утворити такі розміри зони пластичних деформацій, які характерні для реальної конструкції, а також підвести значну енергію до кінця тріщини, щоб імітувати умови руйнування конструкції з великою накопиченою потенційною енергією. Характер кривої G_{cd} подібний a_H на рисунку 7.3, але вона розташовується помітно праворуч. При

цих випробуваннях одночасно можна отримати результати для побудови кривої волокнистості В. Існують спеціальні розрахункові методи для визначення температур гальмування тріщин. Метод Робертсона передбачає випробування листових зразків великої ширини з натуральною товщиною металу (див. розділ 4).

7.3 Основні фактори, що знижують холодостійкість зварних з'єднань

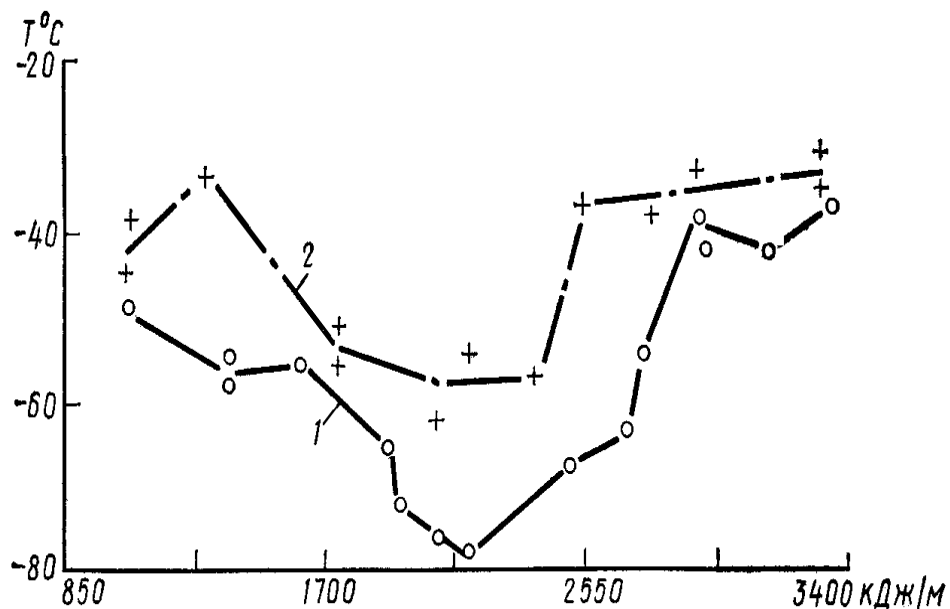
Холодостійкість зварних з'єднань в основному визначається маркою основного металу. Однак присадкові матеріали, технологія виготовлення зварних з'єднань, їхнє конструктивне виконання також значною мірою визначають поведінку зварних конструкцій при низьких температурах.

Хімічний склад металу шва залежить від складу присадкового металу, ступеня змішування з основним металом, легування елементами і вигорання їх при зварюванні, захисту зони розплавленого металу. Властивості металу шва також залежать від способу зварювання, погонної енергії зварювання, характеру експлуатації, температури виробу і навколишнього середовища при зварюванні й інших факторів. При визначенні прийняттого варіанта утворення шва звичайно проводять сукупну оцінку впливу усіх факторів, оптимізуючи окремі з них.

Найбільш простий спосіб порівняльної оцінки властивостей – випробування на ударну в'язкість з визначенням як абсолютного рівня в'язкості металу при температурі вище порога холодоломкості, так і самого температурного порога холодоломкості $T_{кр.1}$. Верхнім порогом холодоломкості вважається температура, при якій цілком зникають у зламі зразків крихкі ділянки.

На рисунку 7.4 [2] наведений приклад, коли оптимізація умов зварювання шва (погонної енергії) проводилася за порогом холодоломкості. Природно, що при зміні умов зварювання одночасно змінюються хімічний склад шва і його кристалізація. Кращі результати отримані при погонній енергії зварювання від 1800 до 2400 кДж/м.

Термічний цикл зварювання досить суттєвий для зон термічного впливу, задовільні властивості яких при незмінному складі основного металу можуть бути отримані тільки за рахунок його раціонального виду. Термічний цикл визначає швидкість нагрівання та охолодження і залежить від погонної енергії і швидкості зварювання. Він здатний викликати зріст зерна, гартування металу, його старіння, відпал і т.ін.



1 – зварювання при $T = 20^{\circ}\text{C}$;

2 – зварювання при $T = -45^{\circ}\text{C}$

Рисунок 7.4 – Верхні пороги холодоломкості металу шва при зварюванні електродами УОНІ-13/45

Тіж самі умови зварювання неоднозначно впливають на поріг холодоломкості шва й навколошовних зон двох близьких за складом сталей Ст. 3сп і 20 (рис. 7.5) [2].

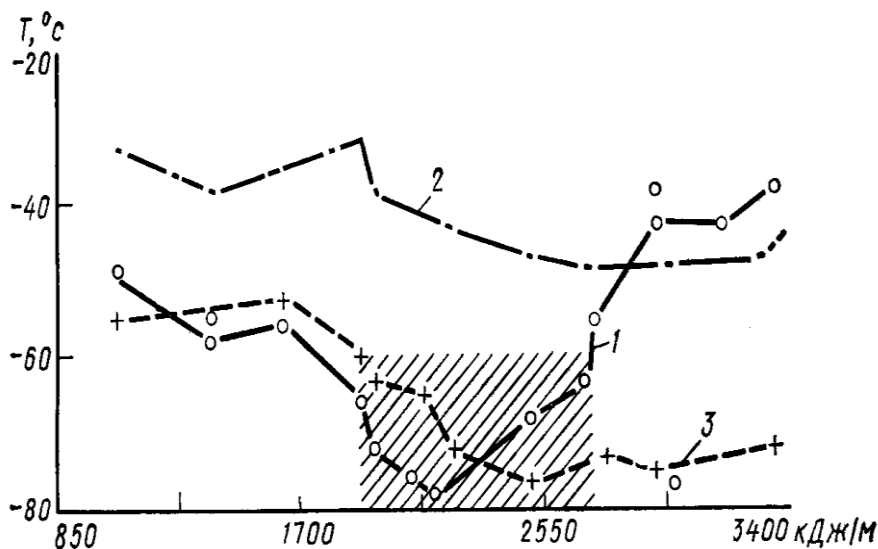


Рисунок 7.5 – Вплив погонної енергії зварювання на розташування верхніх порогів холодоломкості металу шва при зварюванні електродами УОНІ 13/45 (1), зони рекристалізації сталі Ст.3сп (2), зони рекристалізації сталі 20 (3)

Негативний вплив термічного циклу зварювання на властивості металу шва й навколошовних зон можна зменшити, застосовуючи підігрів або

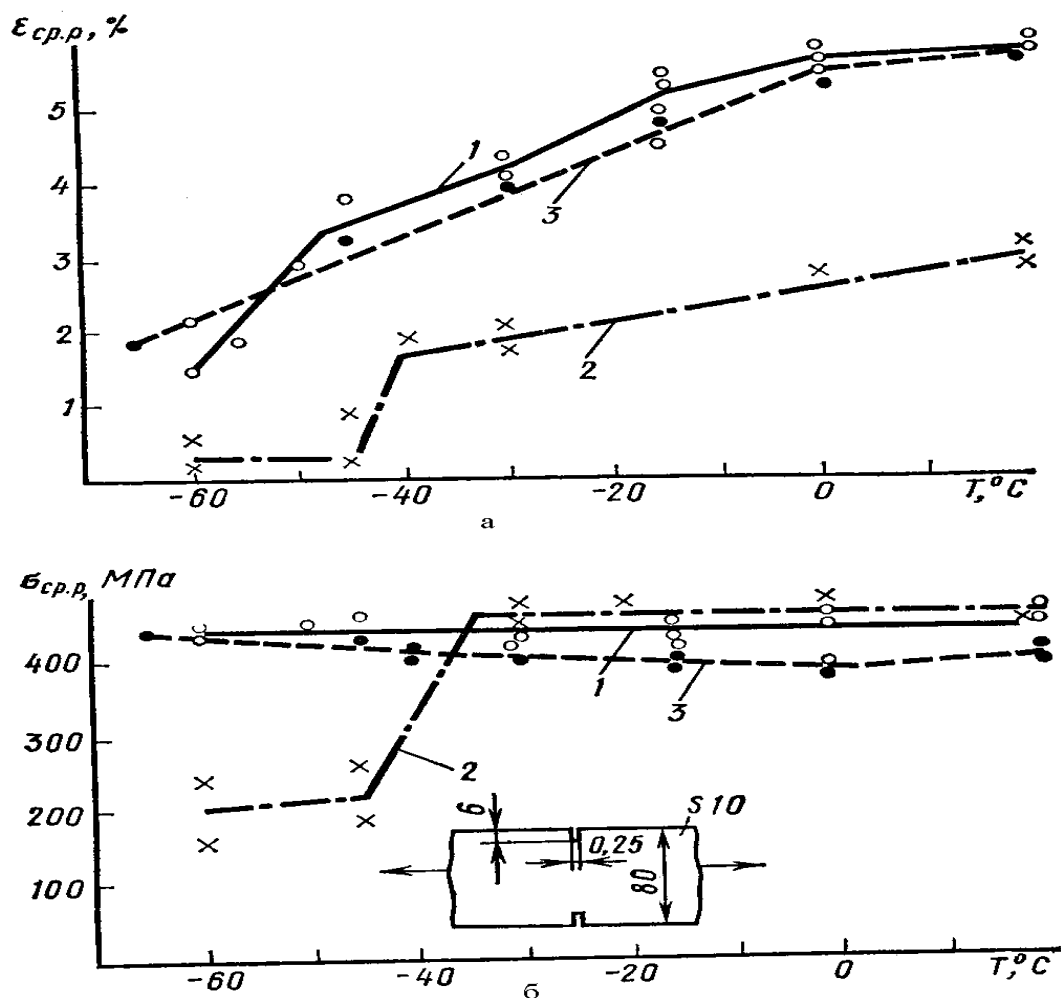
наступну термічну обробку зварного виробу. Для сталей, які чутливі до термічного циклу зварювання, особливо якщо метал зварюється в термічно обробленому стані, у першу чергу необхідно оптимізувати умови зварювання за термічним впливом на навколошовну зону, а потім, у випадку недостатньо високих властивостей металу шва, поліпшувати їх відповідним вибором присадкових матеріалів.

Пластичні деформації металу і деформаційне старіння відносяться до найбільш сильних негативних факторів, які викликають крихкість металу при зниженні температури у випадку, якщо вони відбуваються у несприятливо орієнтованих концентраторах напружень, розташованих у зоні нагрівання від зварювання. До несприятливо орієнтованих відносяться концентратори, площа яких перпендикулярна напрямку головної деформації подовження. Наприклад, непровари в перпендикулярно пересічних стикових швах, непровари в корені багатошарових швів, де концентруються пластичні деформації в міру накладання шарів; стики двох незварених між собою елементів, які пересікаються перпендикулярними швами; кінці флангових швів у зоні переходу стрижневого елемента до косинки; місця зупинки процесу зварювання, у яких виник непровар, площа якого перпендикулярна вісі шва; місця перетинання з'єднань з не цілком провареними швами. До несприятливо орієнтованих концентраторів відносяться також лінії переходу від шва до основного металу і непровари в тих випадках, коли на деякій невеликій відстані від них паралельно укладаються короткі шви, поперечна місцева усадка яких викликає концентрацію пластичних деформацій.

Пластичні деформації створюються, як правило, внаслідок усадки металу або при його вигині. Пластична деформація в концентраторі, яка накопичена при температурі, коли метал знаходиться у в'язкому стані, негативно позначається потім у випадку роботи металу при низькій температурі. Якщо низьковуглецеву або низьколеговану сталь, схильну до деформаційного старіння, після пластичної деформації нагрівати до 200...300°C, то відбувається помітна їх крихкість. Подібний ефект виникає, якщо пластичні деформації відбуваються безпосередньо при температурі 200...300°C в процесі зварювання і який умовно називають динамічним старінням.

На рисунку 7.6 [2] наведені результати випробувань на розтягування сталі 15ХСНД. Реєструвалося середнє руйнівне напруження $\sigma_{\text{ср.р}}$ і середня руйнівна деформація $\varepsilon_{\text{ср.р}}$ в ослабленому перетині. У першому випадку на зразках при кімнатній температурі виконувалася прокатка середньої час-

тини уздовж зразка для створення пластичної деформації близько 1% (біля дна надрізу виникала істотно більша пластична деформація).



1 – вихідний стан; 2 – після старіння;

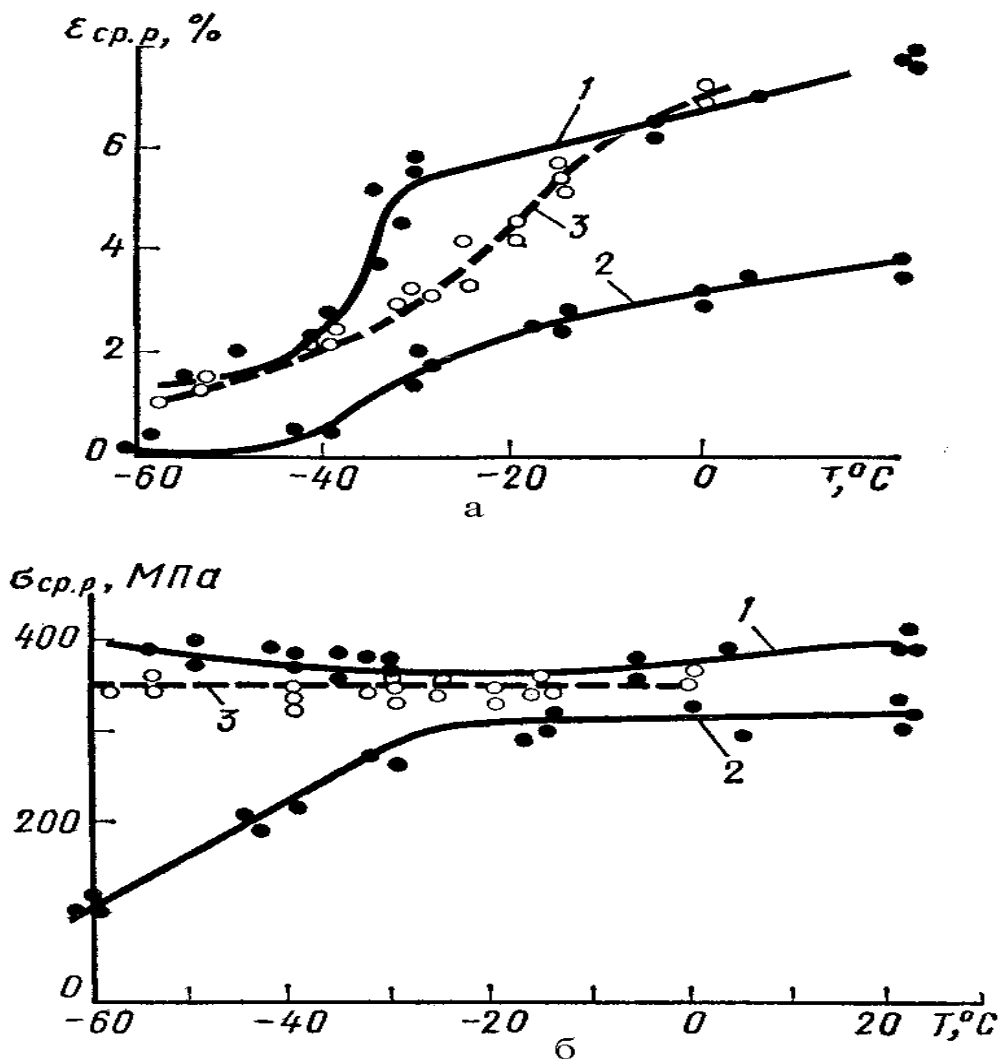
3 – після старіння і відпуску при $T = 650^\circ C$

Рисунок 7.6 – Вплив деформаційного старіння і наступного відпуску на міцність і пластичність зразків зі сталі 15XCHD із надрізами

Потім зразки проходили старіння при $T = 250^\circ C$ протягом 3-х годин. Старіння викликало додаткове зниження середньої пластичної деформації приблизно на 2%, а $\sigma_{ср.р}$ при температурі $T < -40^\circ C$ ставало нижче межі текучості $\sigma_{0.2}$. Наступний відпуск зразків при $T = 650^\circ C$ протягом 3 годин усуває шкідливий вплив старіння.

У другому випадку (рис. 7.7) [2] по кромці зразка зі сталі 22К виконувалося наплавлення валика. Зварювальна пластична деформація викликала в корені надрізу динамічне старіння безпосередньо в процесі зварювання.

Це привело до зниження $\varepsilon_{\text{ср.р}}$ у всьому діапазоні температур і зсуву $T_{\text{кр.2}}$ приблизно в область від -30 до -40°C . Наступний відпуск відновив міцність і пластичність.



1 – вихідний стан;

2 – після наплавлення по кромці;

3 – після наплавлення і високого відпуску при $T = 650^\circ\text{C}$

Рисунок 7.7 – Вплив деформаційного старіння і наступного відпуску на пластичність (а) і міцність (б) надрізаних зразків зі сталі 22К

Форма зварних з'єднань для в'язкого стану металу і відсутності дефектів при однократному навантаженні не є причиною руйнування зварних конструкцій при середніх напруженнях, менших розрахункових або близьких до них, але при крихкому або квазікрихкому стані металу може виявитися достатньою причиною, щоб відбулося руйнування через концентрацію напружень. Небезпека тих або інших конструктивних форм залежить від

ступеня крихкості металу. Так як кількісні співвідношення ще не встановлені, то можна лише вказати порядок зростання небезпеки руйнування. Найменшу концентрацію має стикове з'єднання з плавним переходом від шва до основного металу. Потім ідуть з'єднання з кутовими швами з повним проваром. Напускні з'єднання, коли шви працюють як лобові або флангові, уже мають значну концентрацію напружень, але завдяки високим пластичним властивостям металу шва і відносно невеликим розмірам катетів звичайно не є причиною крихких руйнувань. Найбільшу небезпеку являють стикові та таврові з'єднання з неповним проваром. Небезпека руйнування при тих або інших формах з'єднання залежить від радіусів закруглення й абсолютних розмірів елементів, що беруть участь у зварному з'єднанні. Чим менше радіуси і більше розміри деталей, що зварюються, тим небезпечніше концентратор. У напускних з'єднань широких елементів з косинками навіть радіус закруглення, який зформований кінцем флангового шва, може виявитися достатнім для початку крихкого руйнування основного металу при низьких температурах.

Дефекти зварних з'єднань: несплавлення, тріщини, плоскі за формою шлакові включення, гострі підрізи, місця перетинання швів з ділянками розшарування металу, дрібні невидимі тріщини в кутових швах напускних з'єднань, непроварені місця зупинки процесу зварювання, а також вирізи з малими радіусами після термічного різання, неплавні переходи кореневих валиків до основного металу в багат шарових швах, глибокі нерівності від лускатості поверхні шва, сильні звуження швів через порушення режиму зварювання, здатні викликати руйнування при низьких температурах.

Небезпека крихкого руйнування також залежить від умов експлуатації. Однієї з причин подібного роду є втома металу. Виявляється вона подвійно. На першій стадії через циклічні навантаження в зоні концентрації напружень виникає втома металу і з'являються мікротріщини. На цій стадії немає ще видимих тріщин, однак опірність металу початку руйнування знижується. При ударному навантаженні знижується робота початку руйнування – це збільшує швидкість поширення тріщини, підвищує критичну температуру крихкості. Пізніше, на другій стадії, з'являються тріщини втоми, що є небезпечними концентраторами, тому що, досягаючи критичних розмірів, викликають раптове руйнування зварної конструкції. Кількість руйнувань устаткування зростає в міру збільшення їхнього терміну служби і викликано як нагромадженням втоми в металі, так і появою мікротріщин від утомлення.

На опірність крихкому руйнуванню зварних конструкцій крім втоми негативно впливають також старіння (зміна властивостей металу в процесі тривалого його перебування при високих температурах), підвищена розчинність водню і радіація. Ці фактори зменшують в'язкість металу і підвищують критичні температури.

7.4 Оцінка холодостійкості зварних з'єднань

Через неоднорідність механічних властивостей металу в різних зонах зварного з'єднання його холодостійкість визначають у декількох місцях за в'язкістю при ударному вигині надрізаних зразків. Надріз розташовують у різних зонах. У багат шарових швах можлива неоднорідність властивостей за висотою поперечного перерізу внаслідок різних умов охолодження металу і сегрегації шкідливих домішок в міру укладання окремих шарів. Відповідно зразки виготовляють з кореневої, верхньої і середньої частин шва. При малій кількості проходів таке розходження властивостей не спостерігається.

В однопрохідних швах на опірність металу шва руйнуванню впливає напрямок кристалів, які формуються в процесі його кристалізації. Найбільш слабкою ділянкою звичайно є вісь шва. Розташовуючи надріз по вісі шва властивості металу можна визначити по роботі руйнування при руху тріщини як в напрямку зварювання, так і в протилежному напрямку. Непровар у шві створює концентрацію пластичних деформацій металу при зварюванні і у деяких випадках при визначенні K_c являє собою більш небезпечний надріз, чим утомлена тріщина.

Заздалегідь буває важко сказати, які ділянки зони термічного впливу мають мінімальну опірність крихкому руйнуванню. Тоді надрізи розташовують з невеликим кроком, щоб простежити зміну властивостей металу в залежності від рівня максимальної температури при зварюванні. Звичайно досліджують ряд перетинів від лінії сплавлення до зон з температурою нагрівання 200...250°C.

Друга особливість визначення холодостійкості зварних з'єднань складається в оптимізації умов зварювання. За найменш холодостійкою зоною варіюють режими зварювання, найчастіше погонну енергію, домагаючись найкращих показників ударної в'язкості. При випробуваннях визначають другу критичну температуру $T_{кр.2}$, при якій середнє руйнівне напруження $\sigma_{ср.р}$ дорівнює межі текучості $\sigma_{0.2}$. Розсіювання властивостей мета-

лів, режимів зварювання, форм концентраторів, їхніх радіусів призводить на практиці до того, що окремі екземпляри виробів мають більш високу критичну температуру крихкості. Щоб виявити властивості зварних вузлів при температурах вище $T_{кр.2}$ визначають пластичність їх як при низьких, так і при більш високих температурах. Значення температур, при яких реєструються стабільно високі результати за пластичністю, забезпечують максимально можливі механічні властивості.

Розрахункову оцінку допустимості тріщин при експлуатації зварних конструкцій проводять, орієнтуючись на криву мінімальних значень k_{1c} , як функції температури. Характер кривої k_{1c} по виду подібний кривій a_H (рис.7.3). Якщо не враховується довжина тріщини, то знаходять гранично припустиму мінімальну температуру, при якій ще виконуються вимоги міцності при різних коефіцієнтах запасу.

7.5 Приклади крихких руйнувань

На рисунку 7.8 наведені приклади незадовільного або невдалого проектування і виготовлення зварних з'єднань, що з'явилися осередками руйнувань при низьких температурах.

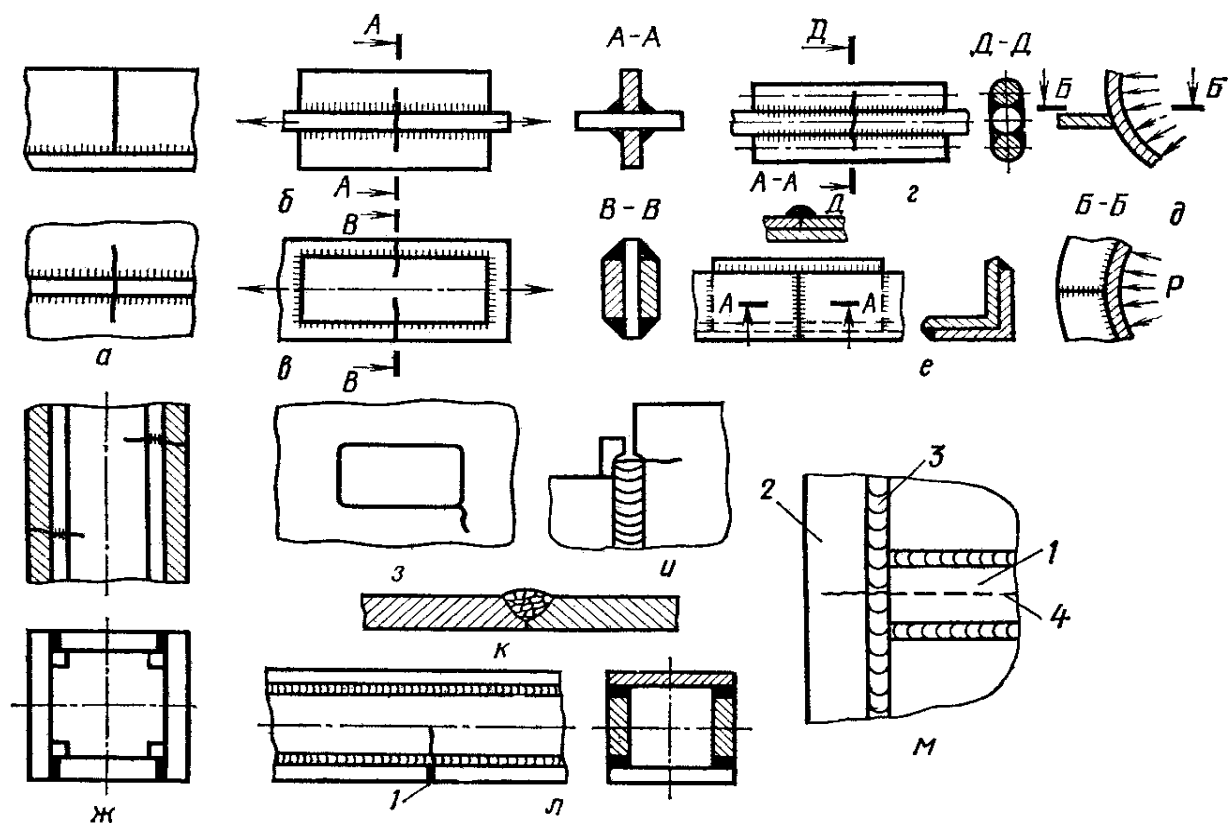


Рисунок 7.8 – Приклад руйнувань у зварних конструкціях

На рисунку 7.8, а...г показані елементи, які перед зварюванням не були з'єднані між собою. На рисунку 7.8, д...ж елементи були попередньо зварені, але мали непровар, від якого поширилася тріщина. Стикове з'єднання (рис. 7.8, к) мало непровар у корені шва. На рисунку 7.8,з вікно, яке утворене газовим різанням, мало гострий кут. На рисунку 7.8,и процес зварювання зупинений на листі, у результаті чого відбувся надріз від підплавлення і від нього виникла тріщина. На рисунку 7.8, л електрошлаковий шов 1, заварений останнім у жорсткому контурі. На рисунку 7.8, м шов 3 перетинає листовий елемент 1, у якому було розшарування металу 4. Від розшарування виникла тріщина у шві і у зоні розтягальних напружень листа 2. Тріщини на рисунку 7.8, а...м показані хвилястими лініями.

7.6 Методи підвищення холодостійкості зварних з'єднань

1 Використовуються такі зварювальні матеріали, які при оптимальних режимах зварювання і наступній термічній обробці дають метал шва, що не уступає за холодостійкістю основному металу.

2 Здійснюється вибір режиму зварювання, який забезпечує достатню холодостійкість зон термічного впливу (ЗТВ). Прагнення зменшити ЗТВ і розміщення в діапазоні температур високого відпуску призводить до необхідності зварювати при малих погонних енергіях, що у свою чергу, створює високі швидкості охолодження і викликає сильне загартування в зоні перекристалізації. Застосування наступного відпуску може полегшити задачу вибору режимів зварювання. Але високий відпуск може реально знизити витривалість зварних з'єднань. Однак небезпека крихкого руйнування є більш істотною, ніж деяке зниження витривалості, тому призначають високий відпуск. Малі швидкості електрошлакового зварювання, що дозволяють уникнути гарячих тріщин, викликають сильний зріст зерна поблизу лінії сплавлення. Для відновлення в'язкості металу ЗТВ необхідно проводити нормалізацію виробу з відпуском.

3 Раціональне конструктивне оформлення зварних вузлів, усунення малих радіусів переходу, відсутність непроварів і застосування ефективних методів контролю якості дозволяють істотно підвищити опірність крихким руйнуванням.

4 Виконується попереднє навантаження конструкції при нормальних температурах, коли неможливі крихкі руйнування. Поява в концентраторах великих пластичних деформацій, які повинні були б виникнути при низьких температурах, збільшує радіус концентратора і створює після розвантаження в зоні концентратора залишкові стискаючі напруження. Наступне навантаження при низьких температурах викликає незначні пластичні деформації в концентраторі, або не викликає їх зовсім.

8 РОБОТА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

8.1 Властивості основного металу

Зі зростом температури в металі знижується міцність міжатомних зв'язків. Тому деформації і напруження можуть змінюватися в часі навіть при постійних навантаженнях. Розрізняють два основних процеси – повзучість і релаксацію.

Повзучість металу – зміна деформацій у часі при постійних напруженнях.

У більшості конструкційних металів при нагріванні до температури $(0,4-0,5)T_{пл}$, (де $T_{пл}$ виражається в К), процес повзучості виражений порівняно слабо. При більш високій температурі характер кривих повзучості залежить від рівня прикладених напружень (рис.8.1) [9].

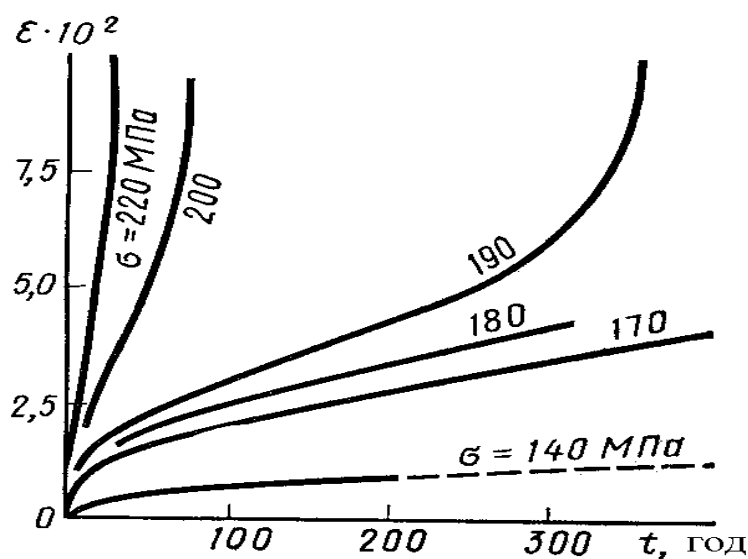


Рисунок 8.1 – Криві повзучості сталі EI 756 при температурі 600°C

Типова крива повзучості, наприклад, при $\sigma = 190 \text{ МПа}$ містить три ділянки, що відповідають трьом стадіям повзучості. Перша стадія, нестала, коли швидкість пластичної деформації повзучості $d\varepsilon/dt$ зменшується. На другій сталій стадії процес протікає з мінімальною швидкістю. На третій стадії швидкість пластичної деформації зростає і настає руйнування. При невисоких температурах і малих напруженнях 2-а і 3-я стадії можуть бути відсутніми. При високих температурах і напруженнях перша стадія може безпосередньо перейти в третю і крива набуде виду, подібного кривій $\sigma = 200 \text{ МПа}$.

В експлуатаційних умовах найбільший інтерес являє друга (коли неприпустимі істотні зміни розмірів деталей) і третя стадія повзучості, які зв'язані з руйнуванням. Так як друга стадія продовжується набагато більше ніж 1-а, деформацію повзучості оцінюють за 2-ю стадією.

Зі зростом напруження і температури зростає швидкість повзучості, що добре описується залежністю

$$V_{\varepsilon_{\min}} = K\sigma^n, \quad (8.1)$$

де $V_{\varepsilon_{\min}} = d\varepsilon/dt$ – швидкість пластичної деформації на 2-й стадії;

n і K – постійні коефіцієнти, які залежать від температури і складу металу;

σ – напруження при одновісьовому розтягуванні.

На рисунку 8.2 [2] подані експериментальні дані відповідно до формули (8.1), які у логарифмічних координатах є прямими. Значення K і n наводяться в довідковій літературі.

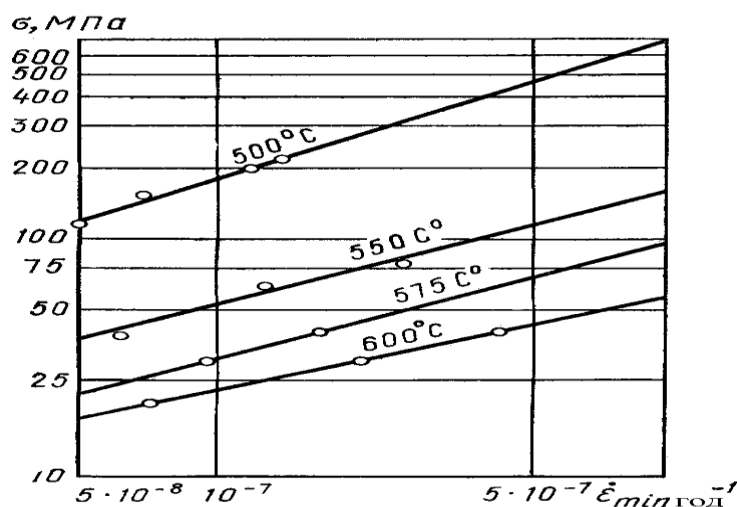


Рисунок 8.2 – Залежність напруження σ від мінімальної швидкості пластичної деформації $\dot{\varepsilon}_{\min}$ для сталі 60Х16М2А

Для деталей установок, що працюють при високих температурах установлюються допустимі напруження у залежності від величини пластичної деформації, що виникає внаслідок повзучості. За умовну характеристику опірності металу повзучості беруть межу повзучості σ_{Π} яка визначається подвійно. Для машин і установок з малою загальною тривалістю роботи – не більш сотень годин – за межу повзучості беруть напруження, при якому деформація за заданий проміжок часу досягає значення встановленого технічними умовами. У деформацію включають і деформацію на 1-ій стадії повзучості. Для деталей установок, що працюють тривалий час, враховують деформації на сталій стадії. Межею повзучості в цьому випадку є напруження, при якому швидкість деформації відповідає встановленій технічними умовами. Для деталей стаціонарних енергетичних установок швидкість деформації звичайно беруть 1% за 10^5 год. (приблизно 11,5 років) і межу повзучості позначають як σ_{T10^5} , де T – температура випробувань, К. Випробування звичайно проводять на протязі $2 \cdot 10^3 \dots 6 \cdot 10^3$ годин при заданій температурі і різних (звичайно трьох) рівнях напружень. Потім, використовуючи формулу для обчислення $\varepsilon_{\min}$ (8.1), відкладають результати випробувань на графіку $\lg \sigma - \lg \dot{\varepsilon}_{\min}$ і екстраполюють пряму в точку установленої швидкості деформації для одержання σ_{Π} (рис.8.3).

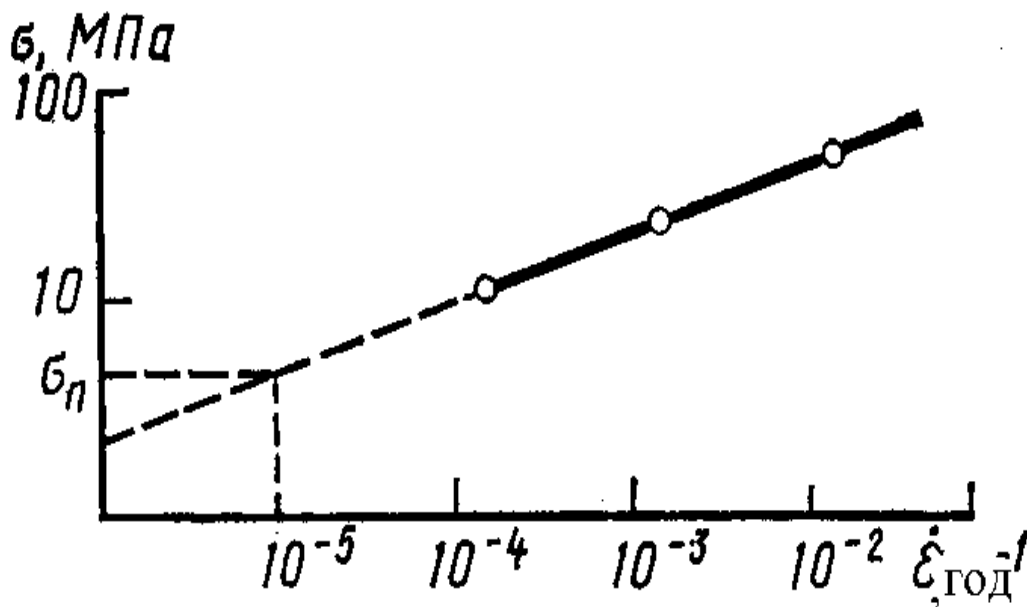


Рисунок 8.3 – Схема визначення межі повзучості σ_{Π} за результатами випробувань при більш високих напруженнях

Міцність матеріалу при високій температурі, що знаходиться під напруженням впродовж тривалого часу, оцінюється межею тривалої міцності $\sigma_{\text{ТМ}}$ – напруженням, що викликає руйнування при заданій температурі через визначений проміжок часу. Для стаціонарних установок беруть $\sigma_{\text{ТМ}} = \sigma_{10^5}$, яке викликає руйнування через 10^5 годин. Для рухомих установок використовують σ_{10^2} , σ_{10^3} , σ_{10^4} .

На рисунку 8.4 [2] наведені значення σ_{10^5} для різних матеріалів.

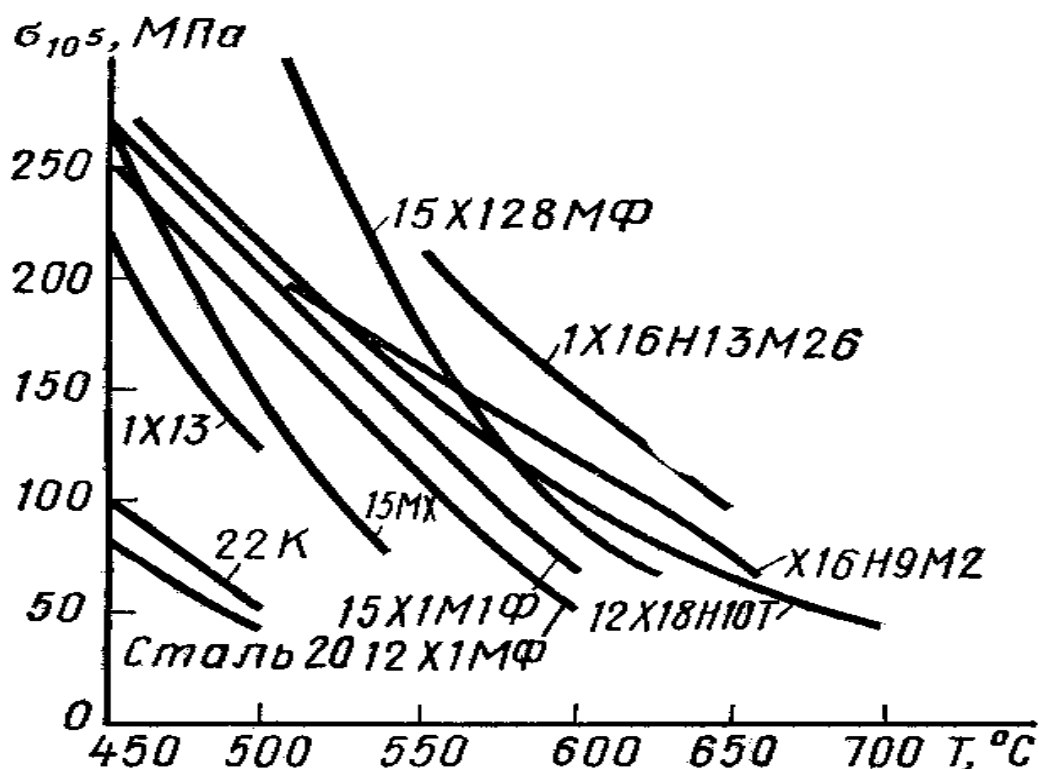


Рисунок 8.4 – Межа тривалої міцності σ_{10^5} для металів у залежності від температури

8.2 Міцність і пластичність металу при високих температурах

Випробування металу на тривалу міцність проводять до руйнування зразка. Чим вище температура і напруження, тим раніш відбувається руйнування. Точка перелому прямої лінії (рис.8.5) [9] відповідає переходу від в'язких руйнувань з утворенням шийки (а), що характерні для високих напружень, невисоких температур і порівняно коротких проміжків часу до руйну-

вання, до крихких міжзеренних (інтеркристаличних) руйнувань (б), які відбуваються при більш низьких напруженнях, високих температурах і тривалих витримках. Перехід до крихких руйнувань відбувається за рахунок поступового ослаблення меж зерен.

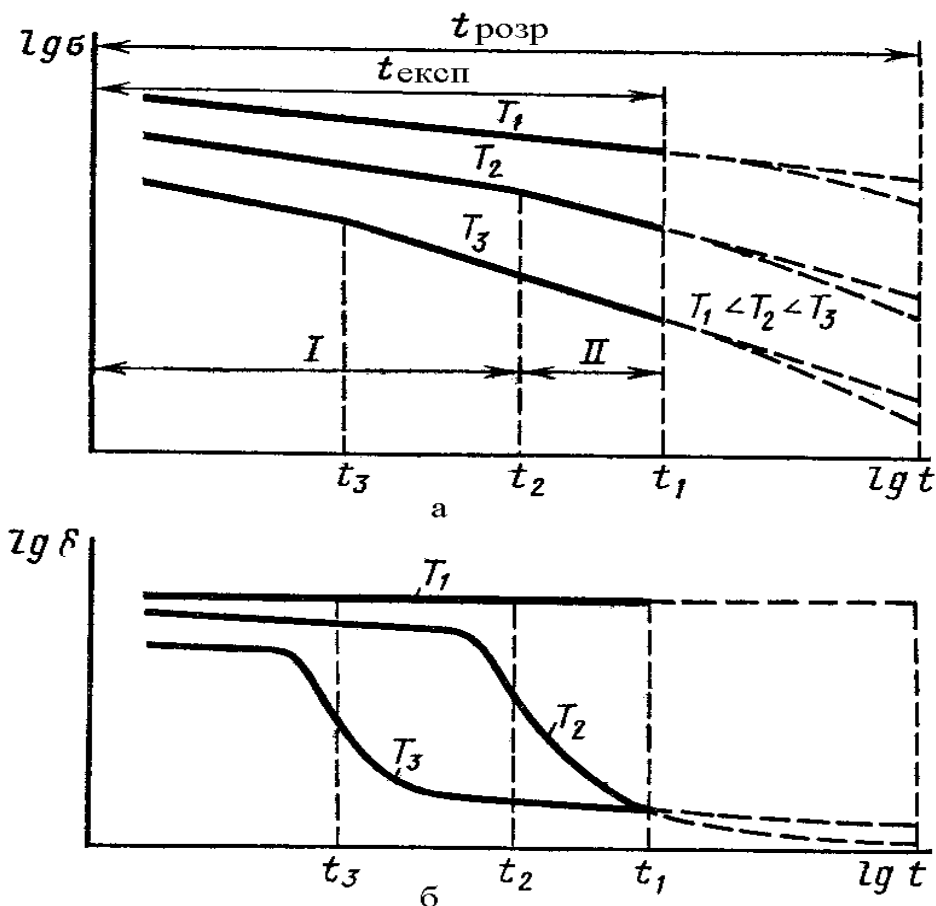
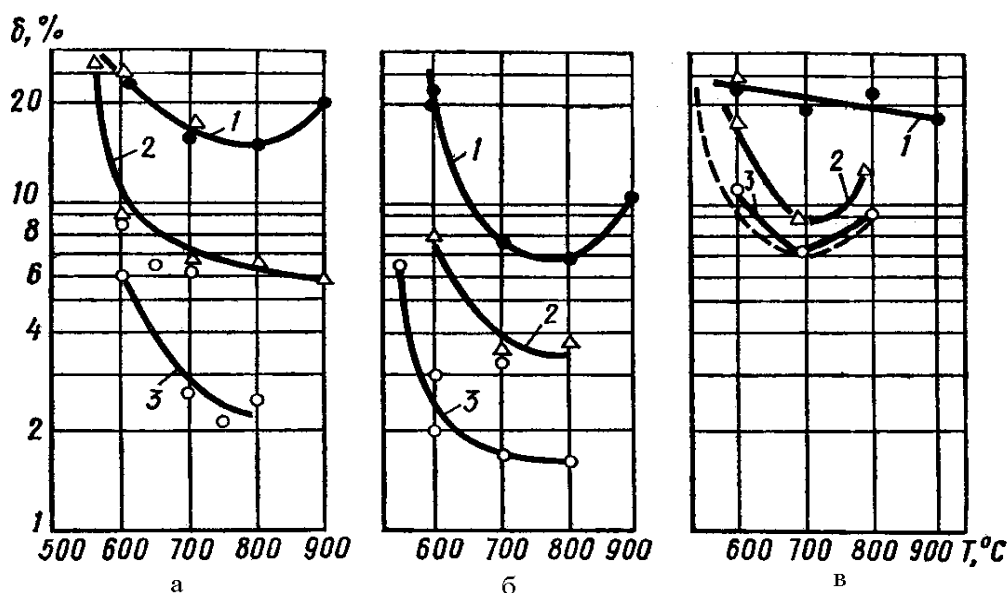


Рисунок 8.5 – Залежність тривалої міцності (а) і пластичності (б) від температури і часу випробування до руйнування

Пластичність металу, яка оцінюється за величиною подовження зразків до руйнування істотно залежить від характеру руйнування (рис.8.5). При в'язкому руйнуванні відбувається монотонне зменшення пластичності в міру збільшення часу до руйнування. При переході від в'язкого руйнування до крихкого міжзеренного (t_1 , t_2) пластичність різко знижується. Руйнування конструкцій при високих температурах, як правило, відбувається без помітної пластичної деформації, тобто крихко.

Установлено наступні закономірності зміни пластичності при високих температурах (рис.8.6) [9]. При відносно невисоких температурах у випадку

в'язкого руйнування пластичність знижується зі зменшенням швидкості деформації, хоча це зниження невелике.



а – без термообробки;

б – стабілізація 10 годин при 800°С;

в – аустенізація 1 година при 1100°С і стабілізація 10 годин при 800°С

Рисунок 8.6 – Залежність пластичності зразків із зварних з'єднань сталі 12Х18Н10Т від температури і швидкості деформації: 20 %/год (1); 0,67 %/год (2); 0,067 %/год (3)

При більш високих температурах зі зменшенням швидкості деформації відбувається перехід до міжзеренного руйнування, який спричиняє істотне зменшення пластичності. У деякому діапазоні швидкостей деформації пластичність досягає мінімуму і при подальшому зменшенні швидкості або не змінюється, або слабо підвищується. Значення мінімальної пластичності може бути одним із критеріїв схильності сталі до крихкого руйнування.

Більш стабільні результати за високотемпературною пластичністю можуть бути отримані за порівняно короткі проміжки часу при випробуваннях з постійною швидкістю деформації, яка забезпечується рівномірним переміщенням захоплювачів машини.

При випробуваннях з постійною швидкістю деформації, але різних температурах пластичність має мінімум, положення якого зміщується в область більш низьких температур при меншій швидкості деформації. У перлітних сталях мінімальна пластичність спостерігається в області

500...600°C і складає 3...5 %. Аустенітні сталі більш схильні до крихких руйнувань. Мінімальна пластичність у них складає частки відсотка в діапазоні 550...600°C. У сплавів на нікелевій основі пластичність падає при 600...750°C. Значення мінімальної пластичності визначається характером легування, структурою, яка залежить від термічної обробки і попередньої пластичної деформації.

На кожній із прямолінійних ділянок (див.рис.8.5) справедлива степенева залежність:

$$t = A \sigma^{-m}, \quad (8.2)$$

де t – час до руйнування;

A і m – постійні коефіцієнти для даного матеріалу, температури і характеру руйнування.

Ця залежність дозволяє екстраполювати результати короткочасних випробувань на більш тривалий термін, але не більше ніж на порядок.

Для скорочення часу випробувань на тривалу міцність використовують параметричні залежності між температурою випробувань і часом до руйнування при незмінному напруженні. Залежність Ларсона-Міллера

$$P = T(C + \lg t) \text{ або } \frac{\Delta H}{R} = P = T(C + \lg t), \quad (8.3)$$

де P – параметр, що є постійним числом для конкретного металу і рівня прикладених напружень;

T – температура, °C;

C – постійна, близька до 20;

t – час прикладання напружень в годинах до руйнування ;

ΔH – енергія активації повзучості;

R – газова постійна.

Ця залежність дозволяє за даними короткочасних випробувань при більш високих температурах визначити тривалу міцність при більш низьких (експлуатаційних) температурах. Для отримання значення параметру P необхідно мати результати декількох випробувань при постійному напруженні, різних температурах і однотипному руйнуванні. При цьому максимальна температура випробувань не повинна перевищувати робочу більш ніж на 50...100°C. Наприклад, якщо температура випробувань металу, для якого

$C = 20$ зростає від 800 до 1000°C, то час руйнування зменшиться від 100 годин при 800°C до 0,035 год. при 1000°C, тобто час до руйнування зразка

при заданому рівні напружень змінюється від температури таким чином, що цей параметр (Π) залишається незмінним.

8.3 Вплив концентраторів напружень на міцність і пластичність металу при високих температурах

Чутливість матеріалу до концентрації напружень виявляється при розтягуванні циліндричних зразків зі спіральним надрізом і оцінюється наступними коефіцієнтами:

$$K_{\sigma} = \sigma_{\text{тм.н}} / \sigma_{\text{тм.г}}; \quad K_{\delta} = \delta_{\text{н}} / \delta_{\text{г}}, \quad (8.4)$$

де $\sigma_{\text{тм.н}}$ і $\delta_{\text{н}}$ – тривала міцність і пластичність надрізаного зразка;

$\sigma_{\text{тм.г}}$ і $\delta_{\text{г}}$ – те ж, гладкого зразка.

Значення K_{σ} знаходяться в межах 0,5...1,0, а K_{δ} може змінюватися від 0,8 до 0,04. Особливо низькі значення K_{δ} у високоміцних аустенітних сталей і сплавів на нікелевій основі.

8.4 Релаксація

Релаксація – зміна напружень у часі при постійних деформаціях. Процес релаксації протікає при повній постійній деформації, яка містить у собі пружну і пластичну складові:

$$\sigma_0 / E = \sigma / E + \varepsilon_{\text{пл}},$$

де σ_0 – початкове напруження, що викликає повну деформацію σ_0 / E ;

σ / E – пружна складова деформації, змінна в часі;

$\varepsilon_{\text{пл}}$ – пластична деформація повзучості.

Характер кривої релаксації при постійній температурі показаний на рис. 8.7.

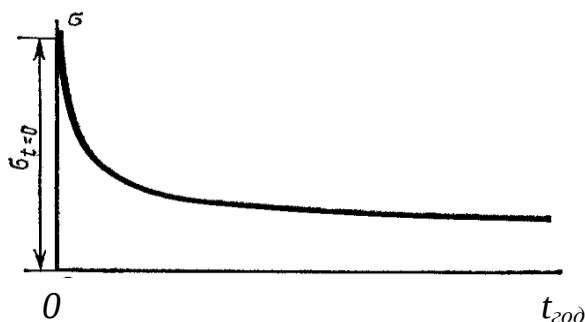


Рисунок 8.7 – Крива релаксації

Пружна складова деформації безупинно зменшується, а пластична – збільшується. Для зварних конструкцій процес релаксації напружень цікавий тим, що є засобом зниження власних залишкових напружень після зварювання.

8.5 Властивості зварних з'єднань при високих температурах експлуатації і вплив на них механічної неоднорідності

Властивості зварних з'єднань при високих температурах експлуатації відрізняються від властивостей основного металу при тих же температурах з двох причин:

1 У зварних з'єднань виникають ділянки (метал шва і зони термічного впливу) з іншими механічними властивостями, ніж в основному металі. Відмінності обумовлені різним хімічним складом металу шва і його структурою в порівнянні з основним металом. У зоні термічного впливу (ЗТВ) можуть відбуватися глибокі зміни через ослаблення границь зерен у результаті перегріву, дисперсійного зміцнення цих зон у процесі дії робочих температур.

2 У зварних з'єднань виникає концентрація напружень, яка при високих температурах діє як фактор концентрації пластичних деформацій повзучості і як фактор постійно діючого напруження в місцях об'ємних схем напруженого стану, де повзучість утруднена.

Оцінка механічних властивостей шва і зон термічного впливу окремо не може дати відповіді на питання про поведінку зварного з'єднання вцілому, тому що при високих температурах у процесі повзучості металу відбувається складна механічна взаємодія окремих зон, яка викликає як вичерпання пластичності металу деяких місць, так і до утворення об'ємного напруженого стану у прошарках з наступним крихким руйнуванням.

Межу повзучості зварного з'єднання, що характеризує опір повзучості на сталій стадії, звичайно не визначають, тому що ділянка зварного з'єднання складає лише невелику частину зварної конструкції і не може чинити помітного впливу на загальну зміну її при експлуатації. Межу повзучості окремо для металу шва визначають, щоб вибрати таку композицію шва, яка б забезпечувала отримання межі повзучості основного металу. Для цього досить провести порівняльні випробування зразків різних складів при температурі експлуатації і при одному рівні напруження. Головними властивостями зварних з'єднань є тривала міцність (табл.8.1) [9].

Зварні з'єднання для визначення тривалої міцності найчастіше випробують на одновісьове розтягування. Розташування шва поперек зразка дозволяє виявити найменш міцну ділянку, а при розташуванні шва уздовж зра-

зка – найменш пластичну ділянку зварного з'єднання. Але через малий перетин циліндричного зразка повною мірою не вдається виявити ефект контактного зміцнення і можливу локалізацію пластичних деформацій в окремих зонах, а також пластичність окремих дуже вузьких ділянок, тому що загальне подовження зразка реєструється як сума пластичних деформацій усіх зон.

Таблиця 8.1 – Межі тривалої міцності основного металу, металу шва

і зварного з'єднання $\sigma_{\text{ТМ}}$, МПа [9]

Марка сталі	Тип електрода	Т випр °C	Основний метал			Метал шва		Зварне з'єднання		
			Тривалість t _{випр} , год.							
			10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ³	10 ⁴	10 ³	10 ⁴	10 ⁵
20	E42A	420	170	120	80	210	140	170	125	80
15ХМ	ЕХМ	510	240	165	120	200	170	240	165	110
12Х1МФ	ЕХМФ	565	170	130	100	190	130	170	120	80
12Х18Н12Т	ЕА1М2Фа	650	130	100	70	180	140	130	100	70
X15H35B3T	ЕА4В3Б2	650	240	210	185	210	200	240	200	160

Ефект контактного зміцнення може бути виявлений на зразках більших розмірів. Ступінь розміцнення зварного з'єднання відносно основного металу залежить від властивостей металу і його реакції на термічний цикл зварювання, а також від температури випробування і часу до руйнування. Зварні з'єднання термічно незміцнених сталей (вуглецеві, хромомолібденові і аустенітні з карбідним зміцненням) рівномічні основному металу і руйнування відбувається поза межами сплавлення.

Тривала міцність зварних з'єднань термічно зміцнених сталей може бути суттєво нижче через розміцнення в зонах термічного впливу. У хромомолібденованадієвих сталях розміцнюється ділянка високого відпуску і неповної перекристалізації; в аустенітних сталях і сплавах з інтерметалідним зміцненням – ділянка поблизу лінії сплавлення, що нагрівається до температур аустенізації. Зоною розміцнення може бути і сам шов, якщо не забезпечена його рівномірність основному металу, що характерно для сталей з високим ступенем легування. Розміцнені ділянки виступають у ролі м'яких прошарків.

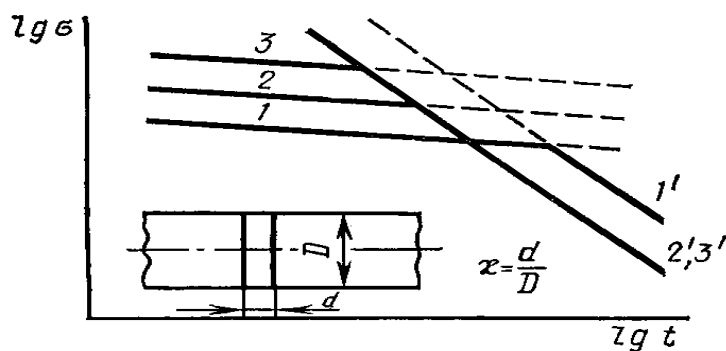
Загальна закономірність підкріплювальної дії сусідніх більш міцних ділянок на м'який прошарок при високих температурах зберігається, якщо

руйнування прошарку відбувається в'язко. Вплив високих температур через повзучість металу виявляється слабкіше в підкріплювальній дії сусідніх ділянок, однак при тривалих витримках руйнування в прошарку може відбутися крихко, причому рівень міцності при цьому може виявитися навіть нижче рівня металу самого м'якого прошарку.

На рисунку 8.8 [9] наведена залежність тривалої міцності м'якого прошарку від часу, якщо міцність основного металу вище міцності прошарку.

Метал м'якого прошарку, випробуваний окремо, на ділянці 1 руйнується в'язко, а на ділянці 1' при тривалих витримках – крихко. При контактному зміцненні міцність зварного з'єднання з прошарком при в'язких руйнуваннях вище міцності самого металу прошарку (лінії 2 і 3), причому для тонкого прошарку (лінія 3) ефект зміцнення виявляється сильніше. Унаслідок контактної зміцнення напруження в м'якому прошарку не є одновісьовим, воно зменшує пластичну деформацію повзучості, що у свою чергу призводить до більш раннього переходу м'яких прошарків від в'язкого руйнування до крихкого, причому їхня міцність виявляється нижче міцності металу м'якого прошарку. На рисунку 8.8 перехід від в'язкого руйнування до крихкого показаний стрибкоподібно.

Ступінь прояву ефекту контактної зміцнення залежить від різниці властивостей основного металу і м'якого прошарку, а також від відносної товщини прошарку.



1 – тривала міцність м'якого прошарку при пластичній деформації у в'язкому (1) і крихкому (1') стані;

2, 3 – міцність м'якого прошарку в крихкому стані при контактному зміцненні ($\chi_2 > \chi_3$);

2', 3' – міцність м'якого прошарку в крихкому стані;

D – діаметр зразка

Рисунок 8.8 – Схема зміни тривалої міцності металу м'якого прошарку шириною d

На рисунку 8.9 [9] наведені графіки тривалої міцності і пластичності зварного з'єднання з м'якими прошарками різної товщини, перший з яких (1) більш міцний, а другий (2) більш пластичний.

При $t < t_1$ руйнування відбувається за основним металом. При $t = t_1$ руйнування переходить у прошарок більшої товщини (3), поперечне зуження Ψ різко падає. При $t > t_1$ нахил лінії міцності 3 більше, ніж лінії 1, що обумовлюється об'ємним напруженим станом і зниженням рівня пластичної деформації. При цьому збільшується кількість фрагментів міжзеренного зламу.

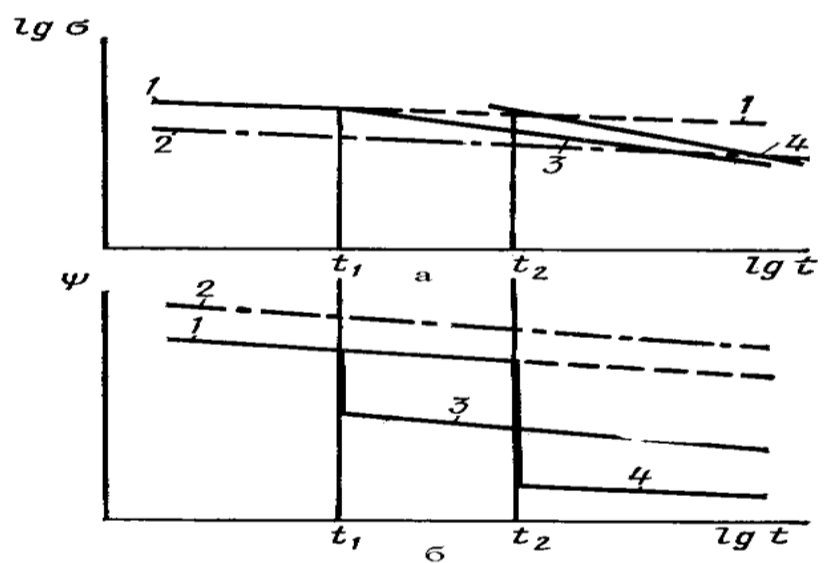


Рисунок 8.9 – Схема зміни тривалої міцності (а) і пластичності (б) зварного з'єднання з м'яким прошарком

У випадку більш тонкого прошарку (4) руйнування в ньому переходить пізніше ($t = t_2$), але нахил прямої 4 виявляється крутіше, а зменшення пластичності значніше через більш сильний ефект об'ємної крихкості. При більшій тривалості межі міцності з'єднання з прошарком можуть стати навіть нижче межі міцності самого металу м'якого прошарку (2).

У залежності від відносної товщини м'якого прошарку χ (рис.8.10) [9] змінюється відношення межі тривалої міцності зварного з'єднання σ'_{TM} до межі тривалої міцності основного металу σ_{TM} , а також пластичність металу до руйнування (δ або Ψ). Причому ця зміна залежить від часу t до руйнування.

Для широкого прошарку ($\chi > 0,5$) контактного зміцнення недостатньо і міцність зварного з'єднання відповідає міцності м'якого прошарку. У випадку нетривалого часу до руйнування (крива t_1) міцність зварного з'єднання виявляється рівною міцності основного металу і при порівняно широких прошарках ($\chi = 0,3 - 0,4$). З'єднання з вузькими прошарками рівноміцні основному металу і при більшому часу до руйнування, але мають меншу пластичність. При дуже великому часу до руйнування (t_4) принципово можливе руйнування, при якому міцність з'єднання виявиться навіть нижче міцності металу м'якого прошарку. З рис. 8.10 видно, що зменшення тривалої міцності супроводжується зниженням пластичності і служить надійною ознакою переходу зварного з'єднання до крихкого руйнування.

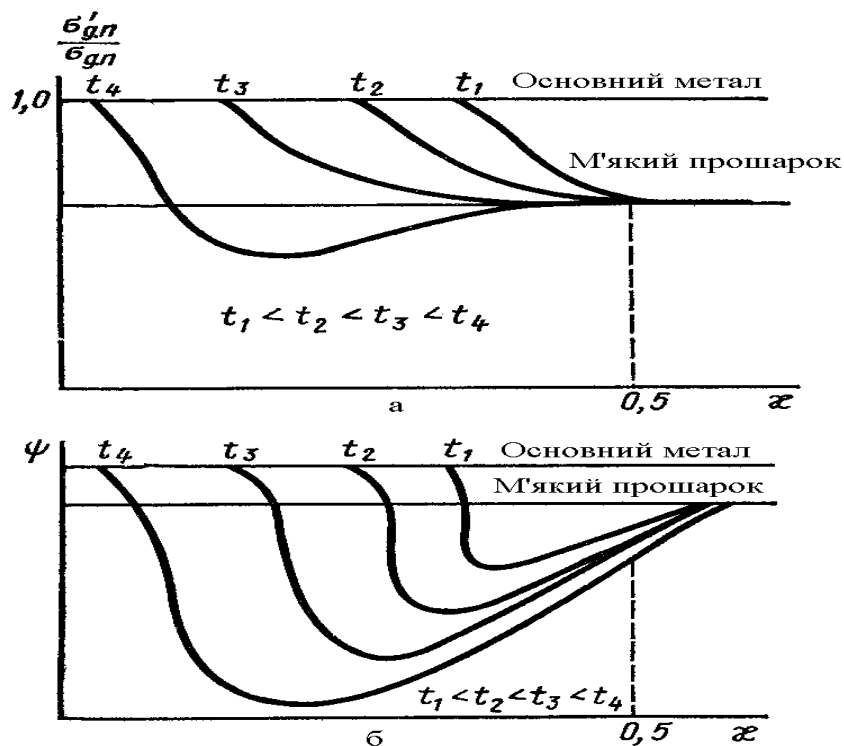


Рисунок 8.10 – Вплив відносної товщини м'якого прошарку на тривалу міцність (а) і пластичність (б) зварного з'єднання

8.6 Локальні руйнування і методи оцінки схильності зварних з'єднань до локальних руйнувань

Часто місцями крихкого руйнування є зони поблизу лінії сплавлення, що охоплюють порівняно невеликі за довжиною ділянки і які одержали назву локальних руйнувань. Для оцінки схильності зварних з'єднань до локальних руйнувань використовують наступні методи:

1 Жорсткі технологічні проби. Виконується зварювання зразків, що відтворюють несприятливі умови, при яких зварювання впливає на зміну властивостей металу й утворення залишкових напружень. Наступна витримка зразків у печах повинна приводити до утворення тріщин. Їх виявляють або оглядом, або розрізкою зразків на частки для визначення кількості тріщин. Визначають також мінімальний час до появи тріщин. Технологічні проби підходять для виявлення більш схильних до локальних руйнувань сталей і відносяться до якісних методів випробувань.

2 Імітація термічного циклу зварювання на зразках. Методи цієї групи засновані на відтворенні термічного циклу зварювання на основному металі і наступному випробуванні зразка в умовах, що відповідають режиму експлуатації. Ці методи дають кількісну оцінку, але вони не повною мірою відтворюють вплив зварювання, наприклад, деформаційний цикл і дифузійні процеси. Перевага їх в тому, що вони не передбачають проведення зварювання і можуть бути використані для оцінки якості сталі на металургійних заводах.

3 Випробування зразків, вирізаних із зварних з'єднань. У даному випадку зразок несе в собі термодеомаційний вплив зварювання, а термічні і силові умови експлуатації створюються під час випробувань. Недоліком таких випробувань є відсутність власних напружень, які властиві натуральним зварним з'єднанням. Випробування зразків на вигин з постійною швидкістю демації виявляє схильність зварних з'єднань до локальних крихких руйнувань. За показник стійкості зварного з'єднання крихкого руйнуванню беруть відносне подовження крайнього волокна до появи тріщини в зразку. Схильність до крихких руйнувань зростає зі зменшенням швидкості демації, що в даному випадку відповідає збільшенню тривалості випробування (див.рис.8.6). Однією з головних причин крихкості є дисперсійне зміцнення. Ослаблення його можливе шляхом відповідного вибору хімічного складу основного і наплавленого металу, режимів зварювання і термічної обробки.

8.7 Розрахунок зварних з'єднань на міцність

Розрахунок зварних з'єднань, що працюють при високих температурах, виконується за допустимими напруженнями, які призначають у залежності від допустимих напружень для основного металу і беруть рівними, з урахуванням способу зварювання, термічної обробки і контролю якості

зварних з'єднань, мінімальному з наступних співвідношень: $[\sigma] = \sigma_B/n_1$; $[\sigma] = \sigma_T/n_2$; $[\sigma] = \sigma_{TM}/n_3$; $[\sigma] = \sigma_{\Pi}/n_4$, де σ_B , σ_T , σ_{TM} , σ_{Π} – гарантовані при температурі експлуатації відповідно тимчасовий опір, межа текучості, межа тривалої міцності і межа повзучості (для дуже точних вузлів). Коефіцієнти запасу n_1 , n_2 , n_3 і n_4 беруть відповідно до таблиці 8.2 [2].

Таблиця 8.2 – Коефіцієнти запасу

Тип конструкції	n_1	n_2	n_3	n_4
Стаціонарні котельні установки (труби, барабани й ін.)	2,6	1,5	1,5	1,0
Стаціонарні турбінні установки	3,75...4,0	1,65...2,0	1,5...3,0	1,0

У залежності від робочої температури характеристиками для розрахунку на міцність є:

- при температурі нижче 250°C (для вуглецевих сталей і сталі 12X1МФ) - тимчасовий опір σ_B ;
- при температурі 260...420°C (для вуглецевих сталей) і нижче 550°C (для сталі 12X18Н10Т) – межа текучості σ_T ;
- при температурі вище 420°C (для сталі 12X1МФ), вище 550°C (для сталей 12X18Н10Т и 12X18Н12Т) – межа тривалої міцності σ_{TM} .

Напруження, що допускаються для зварних з'єднань $[\sigma]$, визначають множенням допустимих напружень для основного металу $[\sigma]$ на коефіцієнт міцності Φ , який враховує негативний вплив зварювання. При повному провару за всією товщиною, проведені в необхідних випадках термічної обробки і контролю якості шва по всій довжині неруйнівними методами коефіцієнт $\Phi = 1$ для вуглецевої, низьколегованої марганцовистої і хромомолібденової сталі, сталей типу 12X18Н10Т та їм подібних; для хромомолібденованадієвих і високохромистих сталей $\Phi = 0,8$. Коефіцієнт міцності стикових з'єднань з вуглецевої і низьколегованої марганцовистої сталі, контроль якості яких неруйнуючими методами виконується не за всією довжиною, береться у залежності від способу зварювання: $\Phi = 0,85$ при автоматичному двосторонньому зварюванні під флюсом, електрошлаковому зварюванні, контактному зварюванні, односторонньому ручному й автоматич-

ному зварюванні в CO₂ або в аргоні; $\Phi = 0,7$ при всіх інших, не зазначених вище видах зварювання.

Для інших зварних з'єднань і нових марок сталей допустимі напруження повинні встановлюватися за результатами випробувань зварних з'єднань.

8.8 Приклад і рішення [1]

Для жароміцного сплаву зафіксовані руйнування через 3500 годин при температурі 650⁰С і напруженні 310 МПа. Якщо створити в матеріалі подібні напруження, але при 705⁰С, який буде час до руйнування? Прийняти $C = 20$.

Рішення

Параметр Ларсона-Міллера визначається за формулою $P = T(C + \lg t)$. Складемо рівняння:

$$650(20 + \lg 3500) = 705(20 + \lg t).$$

Звідки:
$$\lg t = \frac{650(20 + 3,544) - 14100}{705} = 1,7.$$

Час до руйнування складе $t = 50,1$ години.

9 ВПЛИВ КОРОЗІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА НА МІЦНІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

9.1 Корозійні середовища і види корозійних ушкоджень металу і зварних з'єднань

Багато зварних конструкцій експлуатуються в умовах дії активних робочих і зовнішніх середовищ, які можуть суттєво впливати на механічні властивості зварних з'єднань, і для забезпечення високої конструкційної міцності виробу потрібно проведення додаткових конструктивних і технологічних заходів. Статистика відмовлень посудин тиску, звичайних і атомних енергетичних установок представлена в табл.9.1 [1] і наочно демонструє значну роль корозійного середовища у виникненні та розвитку руйнувань.

Таблиця 9.1 – Статистика відмовлень посудин тиску

Причини відмовлень	Кількість відмовлень від повної кількості відмовлень, %	
	Звичайні посудини	Атомні установки
Механічна або термічна утома	26	29
Корозійно-механічна утома	31	41
Дефекти виробництва	19	18
Інші	24	12

Схильність зварних конструкцій до руйнування при одночасному впливу механічних навантажень і активних середовищ залежить від наступних факторів:

- ступеня електрохімічної активності металу різних зон зварного з'єднання, що визначає його термодинамічну нестійкість;
- напруженого стану металу, що реалізує механічне руйнування;
- агресивності корозійного середовища, що залежить від її іонного складу, рН-властивостей, газонасиченості, температури, тиску й інших параметрів.

Одним із суттєвих факторів впливу зовнішнього середовища на міцність металів і зварних з'єднань є корозійний вплив. Найбільш розповсюдженими середовищами, що чинять корозійний вплив, є: вологе повітря; вода і водні розчини солей і лугів; різні хімічні середовища в хімічному виробництві.

Корозія – це руйнування металів унаслідок хімічної або електрохімічної взаємодії їх із середовищем.

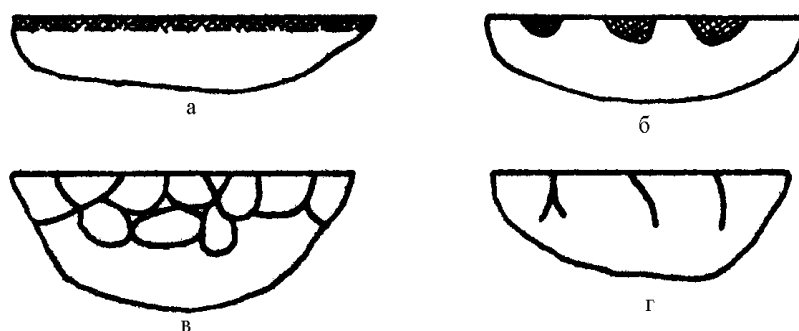
Хімічна корозія – це утворення з'єднань у середовищах, що не проводять електричний струм (пряме з'єднання металу з агресивними складовими середовища).

Електрохімічна корозія – це довільне руйнування металу внаслідок електрохімічної взаємодії з електролітично провідним середовищем, при якому іонізація атомів металу (анодна реакція) і відновлення оксидного компонента корозійного середовища (катодна реакція) протікає не в одному акті. Іони металу направляються з анодних ділянок поверхні в розчин (анодний процес), залишаючи в металі електрони, які переміщуються до катод-

ної длянки, де забираються іоном, що міститься в розчині, або атомом, здатним відновлюватися на катоді. Руйнуються анодні ділянки, які мають більш негативний, у даному середовищі, заряд.

Механізм корозійних руйнувань зварних з'єднань принципово не відрізняється від механізму руйнувань основного металу. Однак зварні з'єднання мають більшу неоднорідність, що викликана розбіжністю хімічного складу, структури окремих зон, геометрією з'єднання, залишковими напруженнями і пластичними деформаціями. Найбільший вплив корозійного середовища визначається в тих випадках, коли в зварних конструкціях діють залишкові напруження.

На рисунку 9.1 [1] приведені основні види корозійних ушкоджень металу. Це загальна рівномірна корозія (а), місцева корозія у виді окремих виразок і поглиблень (б), міжкристалітна корозія (МКК), яка викликає руйнування за межею зерен (в). Зазначені види корозійного ушкодження приводять в основному до зменшення несучого перетину деталі і створенню концентраторів напружень унаслідок зміни геометричної форми поверхні. Мають місце види корозійного ушкодження, що змінюють опір металу різним видам навантаження. Наприклад, з появою в металі сітки дрібних тріщин з'являється так звана корозійна крихкість; під впливом корозійного середовища може знизитися опір втоми; або опір просуванню тріщини, що веде до зниження критерію інтенсивності напружень.



а – загальна рівномірна; б – місцева;

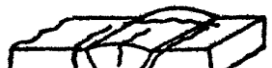
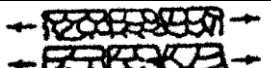
в – міжкристалітна; г – корозійне розтріскування

Рисунок 9.1 – Види корозійних ушкоджень основного металу

Небезпечним видом корозійного руйнування є корозійне розтріскування, коли в напруженому металі при наявності несприятливого середовища з'являється тріщина від гладких поверхонь металу (рис. 9.1, г).

Основні види корозійних ушкоджень зварних з'єднань наведені у таблиці 9.2 [1].

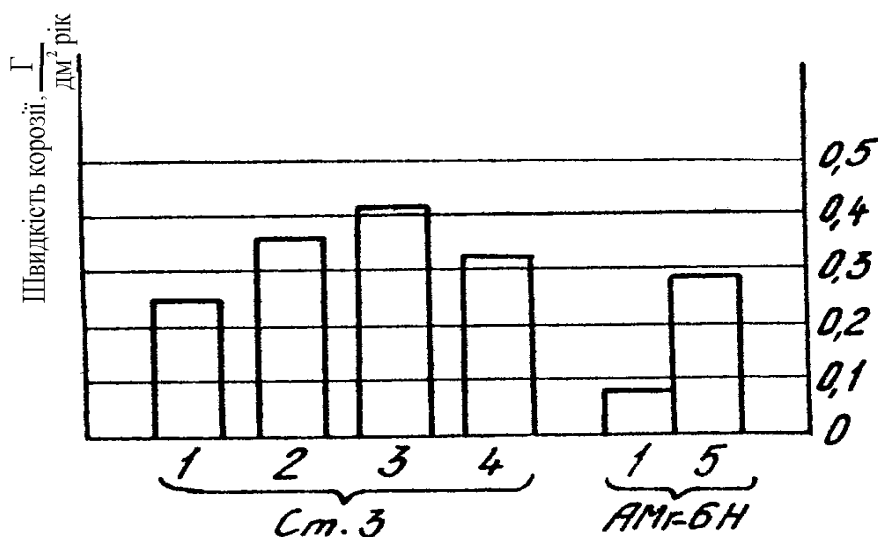
Таблиця 9.2 – Основні види корозійних ушкоджень зварних з'єднань

Тип корозії	Вид корозії	Характер руйнування
Загальна	Рівномірна зварного з'єднання	
	Рівномірна основного металу	
	Зосереджена на шві	
	Зосереджена в зоні термічного впливу	
Місцева	Міжкристалітна структурна:	
	у зоні термічного впливу	
	у зварному шві	
	ножова	
	Точкова пітінгова виразкова	
Під напруженням	Корозійне розтріскування (міжкристалітне і транс-кристалітне руйнування)	
	Корозійна утомленість (міжкристалітне і транс-кристалітне руйнування)	

Корозія може бути загальна і місцева. Загальна корозія може бути рівномірною в межах усього зварного з'єднання, включаючи й основний метал. Це випадки, коли процес зварювання проявляє дуже слабкий вплив на корозійну стійкість. Якщо негативний вплив відсутній, а метал шва є навіть більш стійким, ніж основний метал, то спостерігається рівномірна корозія

основного металу. Навпроти, якщо шов менш стійкий у порівнянні з основним металом, то корозія зосереджена у шві. Слабкими ділянками у відношенні загальної корозії можуть бути зони термічного впливу. Тоді корозія буде зосереджена в них. Зосередження загальної корозії на шві або у наведеношовній зоні є небезпечним видом руйнування, що свідчить про помітний негативний вплив процесу зварювання.

Місцеві види корозії характерні для зварних з'єднань деяких легированих сталей і кольорових металів. Наприклад, структурна міжкристалітна корозія типова для аустенітних і хромонікелевих сталей. Вона може відбуватися в зоні, що нагрівалася до 600...900°C у шві, а також у вузькій зоні, пов'язаною зі швом і яка нагрівалася при зварюванні понад 1250°C. Останній вид одержав назву ножової корозії. Точкова корозія може виникати внаслідок ушкодження поверхневої плівки металів під час нагрівання при зварюванні.

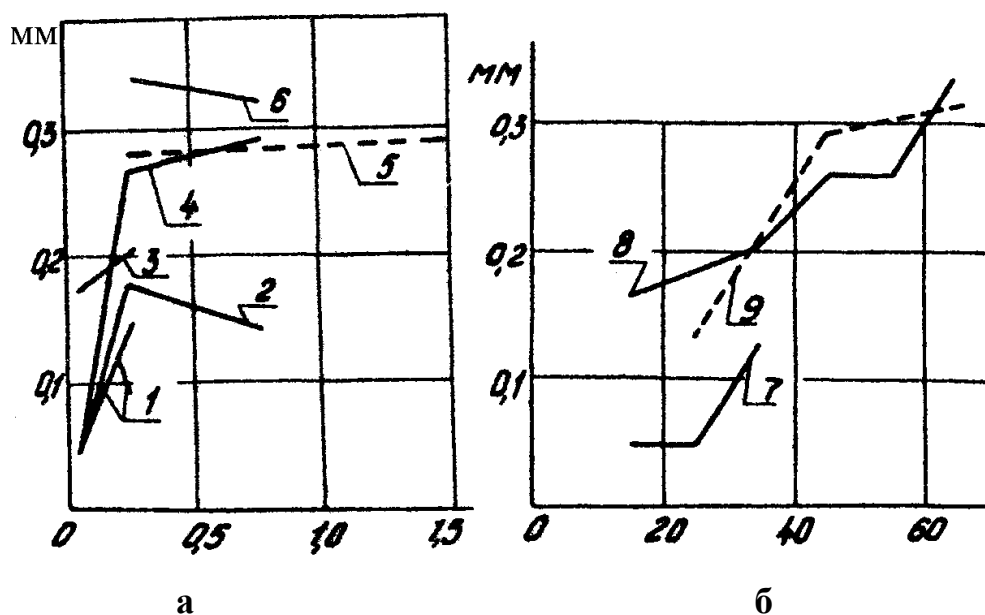


- 1 – основний метал; 2 – ручне дугове зварювання;
 3 – зварювання під флюсом; 4 – зварювання в CO_2 ;
 5 – аргонно-дугове зварювання

Рисунок 9.2 – Середня швидкість корозії зварних зразків (шов і зона термічного впливу) в атмосферних умовах за 3 роки

З даних рисунка 9.2 випливає, що вплив різних видів зварювання на загальну корозію зварних з'єднань зі сталі Ст.3 в атмосферних умовах приблизно однаковий. У сплаві АМг-6Н зварне з'єднання має помітно меншу стійкість у порівнянні з основним металом.

Геометричні особливості зварного з'єднання також впливають на корозію. На рисунку 9.3 [11] приведені дані корозії кільцевих зварних з'єднань труб (сталі Х18Н10Т) з непроваром у корені шва.



1 – глибина непровару 10...20%; 2 – 20...30%;
 3 – 30...40%; 4 – 40...50%; 5 – 50...60%; 6 – 60...70%;
 7 – ширина непровару 0...0,5мм; 8 – 0,05...0,5мм; 9 – 0,5...1,0мм

Рисунок 9.3 – Вплив ширини непровару (а) і глибини непровару (б) на глибину корозії

Випробування виконувалися в азотній кислоті при температурі 30...50°C при тиску в системі 50 атм (5 МПа) за прискореною методикою протягом двох років, що відповідало 9 рокам експлуатації. Збільшення ширини непровару до 0,25 мм підсилює корозію. При значних величинах непровару подальше зростання корозії сповільнюється. Глибина непровару сприяє посиленню корозійного руйнування.

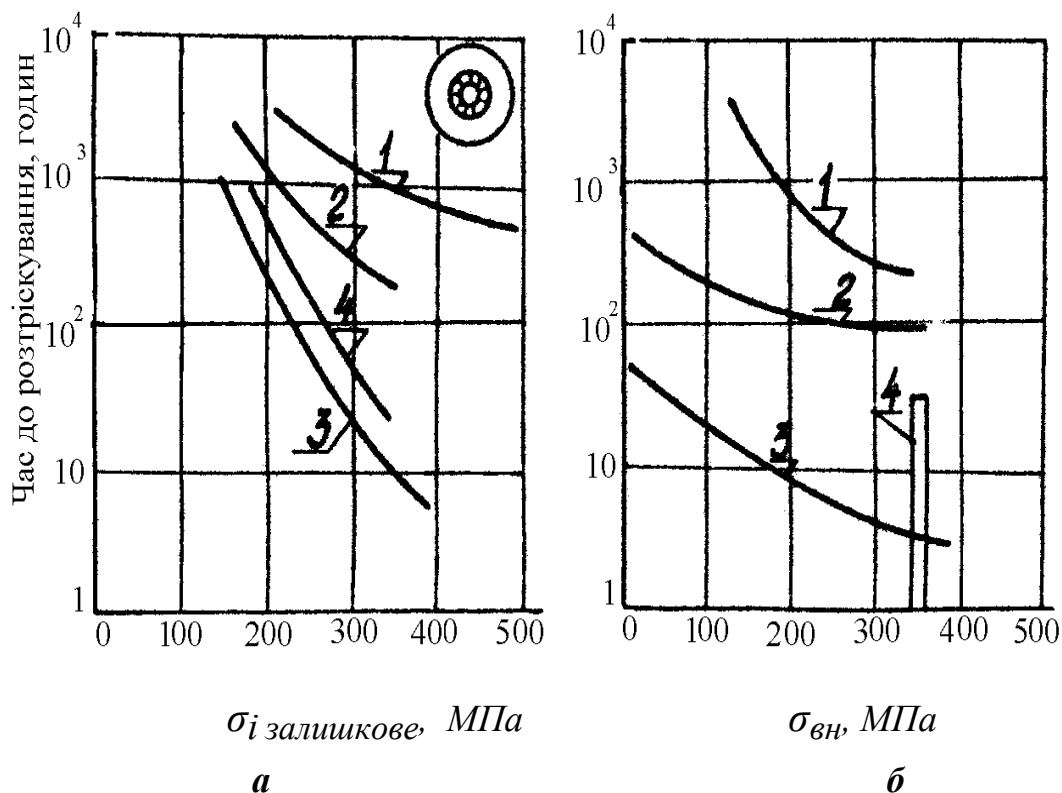
Власні й експлуатаційні напруження впливають на загальну і місцеву корозію. Розтягуючі напруження збільшують швидкість загальної корозії металів у кислих середовищах і незначно в нейтральних і основних середовищах. Більш істотний вплив напружень на місцеві види корозії.

До окремого типу корозійного ушкодження відносять корозійне розтріскування і корозійну утому під напруженням (табл.9.2). Типовими середовищами, у яких відбувається розтріскування зварних з'єднань, є: для вуглецевих сталей – розчини лугів і нітратів; для нержавіючих сталей – хлориди; для алюмінієвих сталей і його сплавів – розчини солей; для титанових сплавів – розчини неорганічних кислот.

У зварних з'єднань крім власних напружень є присутнім значна кількість інших факторів, які проявляють вплив при корозійному розтріскуванні (це пластична зварювальна деформація, хімічна і структурна неоднорід-

ність, наявність різних дефектів і ін.). На рисунку 9.4 [1] показаний вплив рівня еквівалентного напруження σ_i , що виникає в круглому зразку з кільцевим швом від окружних σ_t і радіальних σ_r напружень на час до розтріскування:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_r^2 - \sigma_r \sigma_t + \sigma_t^2} \quad (9.1)$$



а – без зовнішнього навантаження: 1 – Х18Н10Т, киплячий 42%-й розчин хлористого магнію; 2 – ВТ-1-І, розчин 2,5% бром, 15% води, інше – метиловий спирт, 18°С; 3 – ОТ-4, розчин 2,5% бром, 5% води, інше – метиловий спирт, 18°С; 4 – сталь Ст.3, киплячий розчин нітратів, 45 % $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + 35% NH_4NO_3 ;

б – при зовнішньому двовісьовому навантаженні $\sigma_{овн}$: 1 і 4 – без власних напружень; 2 і 3 – з початковими напруженнями; 1 і 2 – сталь Х18Н10Т, киплячий 42%-ний розчин хлористого магнію; 3 і 4 – ОТ-4, розчин бром 2,5%, 15% води, інше – метиловий спирт

Рисунок 9.4 – Вплив залишкових зварювальних напружень на корозійне розтріскування при двовісьовому напруженому стані

При випробуванні зразків з титанових сплавів (криві 2 і 3) різні рівні напружень σ_i досягалися вибором відповідних діаметрів швів, які виклика-

ють необхідні напруження σ_T і $\sigma_{\text{т}}$. Для сталей X18H10T і Ст.3 (криві 1 і 4) різний рівень напружень був отриманий наступним відпуском. Однак дослідження показали, що відпуск не виявив помітного впливу на корозійне розтріскування, тому подані результати розглядаються як залежні від рівня власних напружень, зі збільшенням яких різко знижується час до розтріскування. Імовірно існує деякий невисокий рівень напружень, при якому розтріскування не може наступити в межах досить значних витримок. Вплив власних напружень, викликаних зварюванням, добре проглядається на рис.9.4,б. Додаток зовнішніх навантажень до зразків без власних напружень (крива 1) і з початковим власним напруженням (крива 2) призводить до розтріскування після різної тривалості витримки.

Пластична деформація у залежності від схеми її створення і величини впливає на корозійне розтріскування. На рис.9.5 [1] показана залежність часу до розтріскування від величини пластичної деформації, створеної при різних температурах. Величини пластичних деформацій до 2...3% найбільш несприятливо впливають на міцність.

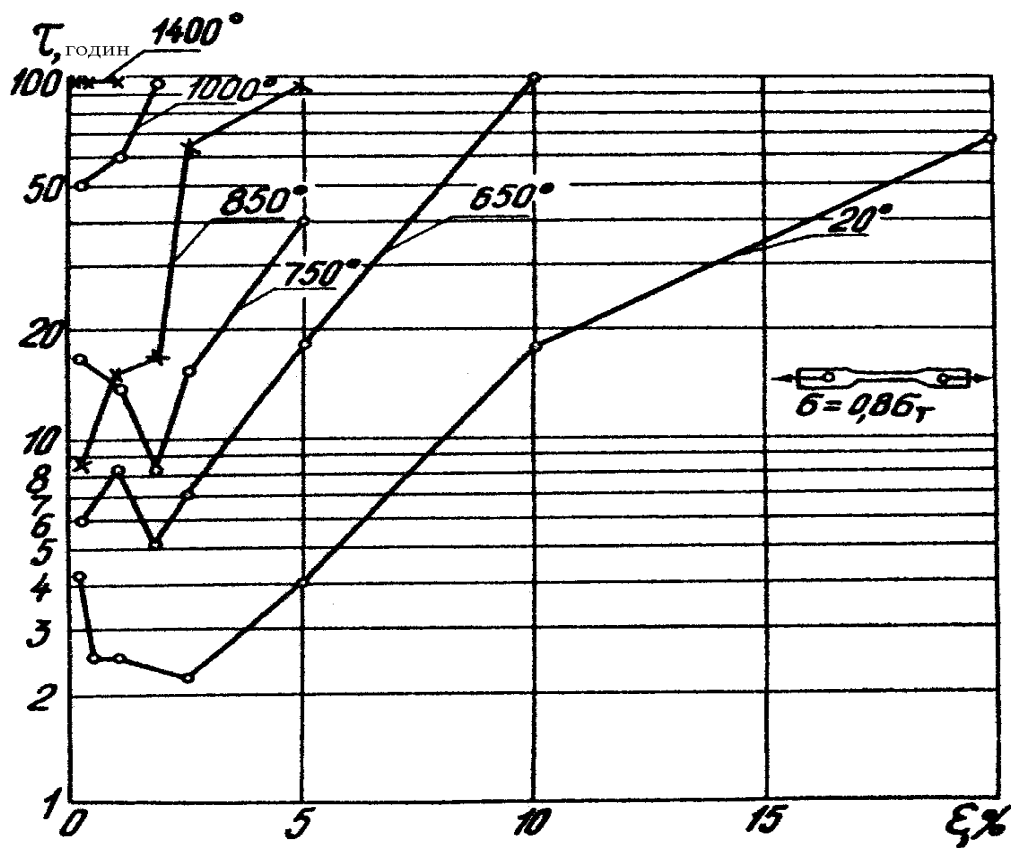


Рисунок 9.5 – Вплив пластичної деформації ε , температури на корозійне розтріскування при напруженні $\sigma = 0,8\sigma_{\text{т}}$ сталі Ст 3, розміщеної у киплячому розчині нітратів 45% $\text{Ca}(\text{NO}_3) + 35\% \text{NH}_4\text{NO}_3$.

9.2 Методи оцінки роботоздатності зварних з'єднань у корозійних середовищах

Методи корозійних випробувань зварних з'єднань поки не стандартизовані. Використовуються методи, які застосовуються для дослідження основного металу, із внесенням до них особливостей випробувань зварних з'єднань. Застосовують також спеціальні методи, які розроблені для зварних з'єднань. Оцінка основного металу при випробуванні на загальну корозію виконується за масовим показником K , який визначає зміну маси за формулою

$$K = \frac{P_0 - P_1}{F t}, \quad (9.2)$$

де P_0 – маса зразка до випробування, г;

P_1 – маса зразка після випробування, г;

F – площа зразка, м^2 ;

t – час випробування, год.

Розповсюджений також показник глибини корозійного шару. Існуючі метали розбиті на 6 груп і оцінюються за 10-бальною шкалою (табл.9.3) [1].

Таблиця 9.3 – Показник глибини корозійного шару

Групи	Бал	Глибина корозійного шару, мм/рік
1 Зовсім стійкі	1	0,001
2 Дуже стійкі	2/3	$\frac{0,001 - 0,005}{0,005 - 0,01}$
3 Стійкі	4/5	$\frac{0,01 - 0,05}{0,05 - 0,1}$
4 Знижено стійкі	6/7	$\frac{0,1 - 0,5}{0,5 - 1,0}$
5 Малостійкі	8/9	$\frac{1,0 - 5,0}{5,0 - 1,0}$
6 Нестійкі	10	Понад 10

Роботоздатність зварних конструкцій у корозійних середовищах залежить головним чином від роботоздатності зварних з'єднань. На неї впливають властивості основного металу і зварювальних матеріалів, метод і технологія зварювання, конструктивне оформлення зварного з'єднання, умови

експлуатації: корозійне середовище, температура, навантаження. Більш якісна оцінка стійкості зварного з'єднання проводиться за наступними ознаками (табл.9.4):

- стійкість проти загальної корозії;
- схильність до міжкристалітної корозії;
- ступінь зміни механічних властивостей під впливом корозійного середовища;
- стійкість проти розтріскування при наявності корозійного середовища і напружень.

Таблиця 9.4 – Показники стійкості металів і зварних з'єднань у різних корозійних середовищах [1]

Тип корозійного руйнування	Основні методи та способи оцінки корозії	Показники	Коефіцієнти $K_{зм}$ відносної стійкості основного металу (М) і зварного з'єднання (З)
1	2	3	4
Суцільна загальна корозія (с.к)	Ваговий – визначення зміни маси	$g, \text{г}/(\text{м}^2 \text{ год})$	g_M/g_Z
	Профілографічний – визначення глибини корозії	$h, \text{мм/рік}$	h_M/h_Z
	Механічний-визначення зміни механічних властивостей: - при розтягуванні, - при вигину	$\sigma_B, \text{МПа}; \delta, \%,$ $P, H; \alpha, \text{градус}$	$\sigma_Z/\sigma_M; \delta_Z/\delta_M;$ $P_Z/P_M; \alpha_Z/\alpha_M;$
	Електрохімічний-визначення електрохімічного потенціалу	$\varphi, \text{мВ}$	φ_M/φ_Z
Місцева корозія (м.к)	Механічний: - при розтягуванні,	$\sigma, \text{МПа}; \delta, \%$	$\sigma_Z/\sigma_M; \delta_Z/\delta_M$
	- при вигині	$P, H; \alpha^0,$	$P_Z/P_M; \alpha_Z/\alpha_M$
	Визначення глибини руйнування	$h, \text{мм/рік}$	h_M/h_Z

Продовження таблиці 9.4

1	2	3	4
Корозійна утомленість	Умовна межа корозійно-цикличної міцності	σ_N , МПа	$\sigma_N(3)/\sigma_N(м)$
	Кількість циклів до руйнування	N_p	$N_p(3)/N_p(м)$
Корозійне розтріскування	Час розтріскування	t, рік	t_m / t_3
	Величина критичного навантаження	$\sigma_{кр}$, МПа	$\sigma_{кр}(3)/\sigma_{кр}(м)$
	Величина коефіцієнта інтенсивності напружень	K_{Ic} , МПа $\times m^{1/2}$	$K_{Ic}(3)/K_{Ic}(м)$

Лабораторні випробування зварних з'єднань проводяться в два етапи:

- випробування на загальну і місцеву корозію без навантаження;
- у випадку достатньої стійкості при випробуваннях на першому етапі визначають корозійну стійкість під напруженням.

Випробування на загальну корозію за глибинним показником проводяться відповідно до ДСТ 5272-85. Так як глибина корозії в різних зонах зварного з'єднання може бути різною, доцільно для більш об'єктивної оцінки стійкості різних зон знімати профілограму за шириною зварного з'єднання.

Випробування аустенітних і аустенітно-ферітних сталей на міжкристалітну корозію проводяться за ДСТ 6032-85. Визначення схильності до МКК засновано на кип'ятінні зразків у відповідних розчинах. Наступне дослідження шліфів дозволяє визначити характер корозії. Застосовують також спеціальні методи травлення, виміру електроопірності, зміни металевого звуку й ін.

За допомогою механічних випробувань зварних з'єднань визначають зниження несучої здатності з'єднання як внаслідок ослаблення перетину при загальній корозії, так і внаслідок зниження міцності і пластичності ме-

талу від місцевої корозії. Випробування на вигин має деяку перевагу перед випробуванням на розтягування, особливо при визначенні пластичності. Випробування на вигин дозволяє більш чітко виявляти зміну властивостей на поверхні металу.

Випробування зварних з'єднань на корозійне розтріскування проводять як при відсутності зовнішніх навантажень, так і при їхній дії (рис.9.6, 9.7) [1]. Випробування без зовнішніх навантажень відповідають умовам експлуатації слабо навантажених зварних конструкцій, вони дозволяють також оцінити роль залишкових власних напружень. Найпростішим випадком є випробування зварних пластин з одним або двома пересічними швами (рис.9.6,а). Тут власні напруження при одному шві – одновісьові, а при двох швах – мають незначне додаткове напруження. У трубчастих зразках з подовжнім і кільцевим швом імітуються умови роботи трубопроводів (рис. 9.6, б).

У круглих зразках діаметром 100...150мм із товщиною 2...5мм і асиметричним швом діаметром 20...40мм (рис. 9.6, в) виникають двовісьові розтягувальні напруження, які чинять більш сильний вплив на розтріскування, ніж одновісьові напруження. За об'єкти дослідження можуть бути узяті і зварні вузли (рис. 9.6, г).

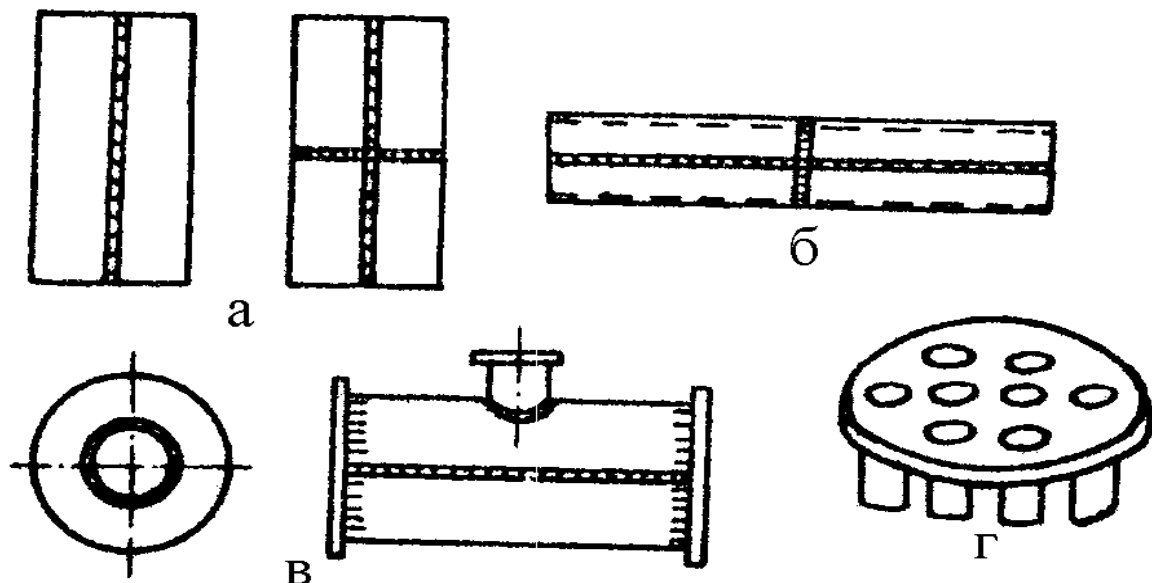


Рисунок 9.6 – Приклади зварних зразків і вузлів, які використовуються у дослідженнях на корозійне розтріскування

Додаток зовнішніх навантажень дозволяє інтенсифікувати процес корозійного розтріскування, особливо при наявності значних власних напружень. Навантаження можуть бути прикладені за схемою постійної деформації (рис. 9.7, а), або постійного напруження (рис 9.7,б) [1].

Схема постійного напруження в більшому ступені відповідає реальним умовам експлуатації зварних конструкцій. Способи навантаження зварних елементів найрізноманітніші: розтягування одновісьові та двовісьові з різними співвідношеннями головних компонентів; вигин одновісьовий і двовісьовий і т.ін.

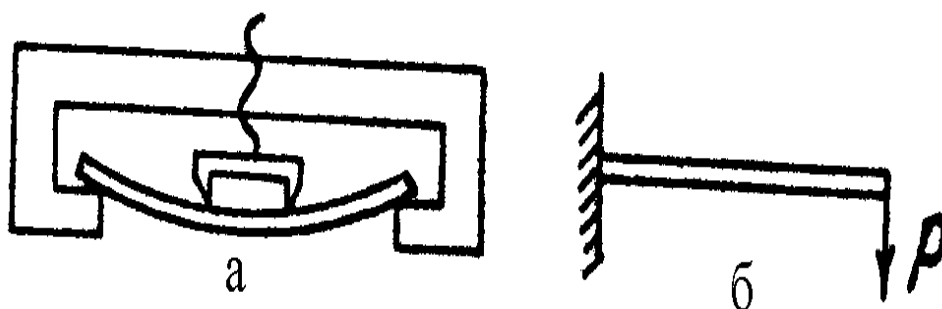


Рисунок 9.7 – Навантаження за схемою постійної деформації (а) і постійного напруження (б)

При застосуванні малих по величині зварних зразків, що не мають великих власних напружень, метод може використовуватися лише для порівняльної оцінки різноманітних технологічних варіантів одержання зварного з'єднання.

Відомості про дійсну стійкість зварного вузла можуть дати тільки методи, у яких використовуються досить великі зразки, що зберегли всі основні негативні наслідки зварювання. У таблиці 9.5 [1] наведені орієнтовні показники стійкості металів і зварних з'єднань у різних корозійних середовищах.

Таблиця 9.5 – Показники стійкості металів і зварних з'єднань у різних корозійних середовищах

Матеріал	Корозійне середовище	Стійкість основного металу			Основний вид корозійного руйнування зварного з'єднання
		Загальна корозія	Місцева корозія (МКК, точкова)	Корозійне розтріскування	
1	2	3	4	5	6
Вуглецева сталь типу Ст.3	Атмосферні умови	Стійкий ³ (4...5 балів)	Стійкий ¹	Стійкий ¹	Загальна корозія
	Морська вода	Мало-стійкий ³ (7...8 балів)	Стійкий ¹	Стійкий ¹	Загальна зосереджена корозія
	Їдкий натр 50%	Знижено стійкий (6 балів)	-----	Розтріскується ³	Корозійне розтріскування
Технічний титан ВТ-1-1	Атмосферні умови і морська вода	Зовсім стійкий ¹ (1 бал)	Стійкий ¹	Стійкий ¹	Стійкий
	Азотна кислота 65%	Стійкий ²	Можлива МКК ²	Можливе розтріскування	МКК
	Соляна кислота 20°C	Знижено стійкий ³ (6 балів)	Стійкий ³	Стійкий ²	Загальна корозія
Нержавіюча сталь типу Х18Н9	Атмосферні умови	Дуже стійкий (2-3 бала)	Стійкий ¹	Стійкий ¹	Стійкий
	Морська вода	Стійкий ² (4-5 балів)	Піддається точковій корозії ²	Стійкий ¹	Точкова корозія
	Азотна кислота 65%	Стійкий ³ (5 балів)	Піддається МКК ³	Стійкий ³	Міжкристалітна корозія
	Соляна кислота (0-50°C)	Знижено стійкий ³ (6 балів)	Стійкий ³	-----	Загальна зосереджена корозія
	Насичений розчин хлористого магнію	-----	-----	Розтріскується ³	Корозійне розтріскування

Примітка. Показник ступеня характеристики означає :

- 1 Зварне з'єднання рівномірне основному металу.
- 2 Стійкість зварного з'єднання близька до стійкості основного металу.
- 3 Стійкість зварного з'єднання нижче стійкості основного металу.

9.3 Міцність зварних з'єднань в агресивних середовищах [0]

У загальному випадку міцність зварних з'єднань можна подати у такому вигляді:

$$M_{AC} = M + H + C, \quad (9.3)$$

де M – властивості матеріалу;

$$M = M_B + M_T + M_e, \quad (9.4)$$

де M_B – вихідні властивості матеріалу;

M_T – зміна властивостей матеріалу при технологічній обробці;

M_e – зміна властивостей матеріалу при експлуатації.

H – напружений стан;

$$H = H_B + H_e, \quad (9.5)$$

де H_B – власні напруження;

H_e – напруження при експлуатації

C – властивості середовища;

$$C = C_B + C_3, \quad (9.6)$$

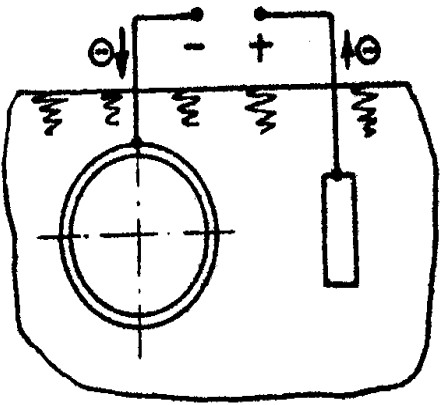
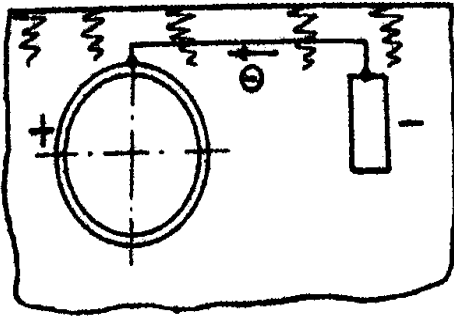
де C_B – вихідні властивості середовища (хімічний склад, ступінь активності);

C_3 – вплив на властивості середовища зовнішніх умов (температура, тиск та ін.)

9.5 Основні методи підвищення стійкості зварних з'єднань проти корозійного руйнування

Підвищення стійкості зварних з'єднань може здійснюватися загальними методами, що придатні для металевих конструкцій взагалі і спеціальними методами, які характерні для зварних з'єднань.

Загальні методи включають:

- раціональний вибір основного металу, стійкого проти різних видів корозійного руйнування;
- раціональне конструювання;
- використання технологічних процесів виготовлення деталей, що забезпечують їхню максимальну стійкість;
- застосування різного роду захисних покриттів: а) на органічній основі (лакофарбові покриття); б) на неорганічній основі (оксидні, фосфатні, хромисті й ін.); в) металевим, що утворений плакуванням, дифузією, гарячою металізацією, напиленням, наплавленням та ін.;
- раціональна експлуатація виробу, що включає в себе проведення профілактичних оглядів, ремонтів, випробувань;
- застосування методів гальмування корозії за рахунок обробки корозійного середовища, введення сповільнювачів корозії й електрохімічного захисту, які можуть бути здійснені за рахунок подачі зовнішнього струму (рис. 9.8, а) , або шляхом застосування протекторів (рис.9.8,б) , які грають роль аноду. В обох випадках істотно уповільнюються процеси руйнування конструкції.

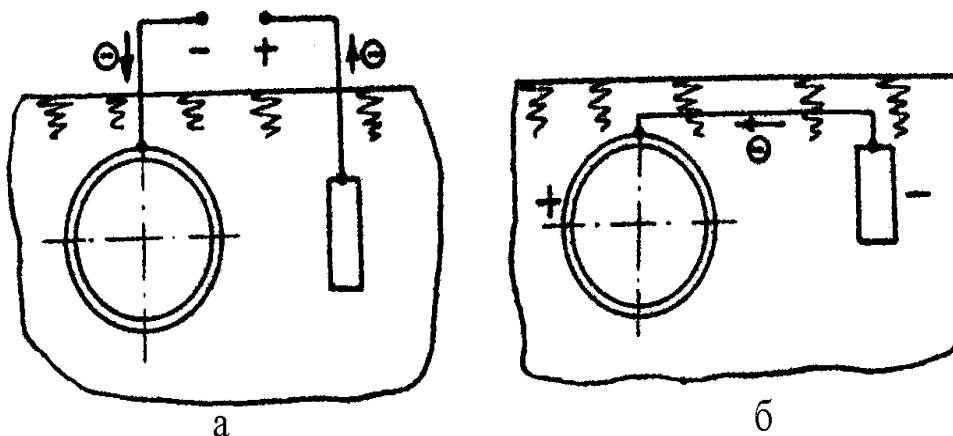


Рисунок 9.8 – Приклади електрохімічного захисту підземного трубопроводу за рахунок підведення зовнішнього струму (а) або застосування протектора (б)

Спеціальні методи спрямовані на зменшення неоднорідностей, внесених зварювальним швом або самим процесом зварювання. При використанні зварювальних матеріалів необхідно прагнути до того, щоб хімічний склад шва як найбільше збігався з хімічним складом основного металу. Виконуючи процес зварювання, необхідно домагатися зменшення термопластичного впливу процесу зварювання на властивості металу.

До спеціальних методів відносяться:

- підбір раціональних присадкових матеріалів;
- призначення таких зварних з'єднань, що дозволяють регулювати хімічний склад металу шва;
- регулювання термічного циклу зварювання й умов кристалізації, а також використання різних прийомів з метою поліпшення структури шва й навколошовної зони (зварювання з мінімальними погонними енергіями, концентрованими джерелами тепла, додатковим охолодженням й ін.);
- регулювання процесу зварювання з метою одержання мінімальних залишкових напружень;
- одержання зварного з'єднання без дефектів зварювання з мінімальною концентрацією напружень;
- усунення дефектів зварювання;
- термічна і механічна обробка зварних з'єднань з метою стабілізації структури, зняття напружень, зменшення концентрації напружень.

10 РОЗРАХУНКОВА І КОНСТРУКЦІЙНА МІЦНІСТЬ

10.1 Несуча здатність зварних конструкцій

Несуча здатність – опірність конструкції появі граничних станів, пов'язаних з дією навантажень. Для неї найбільш важливими є механічні властивості зварних з'єднань – здатність опору деформуванню й руйнуванню під дією зовнішніх і власних механічних сил з урахуванням умов їхнього утворення. Міцність, пластичність, в'язкість, твердість – окремі види механічних властивостей, які залежать від властивостей металу окремих його ділянок, геометричних форм зварного з'єднання, залишкових напружень і ступеня розсіювання кожного із зазначених факторів.

Особливості механічних властивостей зварних з'єднань у порівнянні з основним металом: більш значне розсіювання факторів; неоднорідність властивостей окремих ділянок зварного з'єднання (як механічних, так і фі-

зичних і хімічних властивостей); форма й можлива наявність дефектів, не-суцільностей, які визначають концентрацію напружень; наявність високих залишкових власних напружень, які у взаємодії з експлуатаційними можуть істотно впливати на механічні властивості зварних з'єднань у цілому.

Поняття несучої здатності більш широке, ніж поняття міцності, тому що вона враховує додаткові фактори – умови роботи конструкції: порушення суцільності, корозійну стійкість, герметичність, опір потоку, недостатню жорсткість, граничну деформацію, появу вібрації і т.і, які є граничними станами і визначають несучу здатність конструкції. Основними факторами, що мають істотний вплив на несучу здатність зварної конструкції є:

- діючі навантаження і викликані ними напруження;
- статичний або динамічний характер навантажень (пульсуючий, си-метричний, випадковий);
- неоднорівність діючих напружень;
- концентратори напружень, що розрізняються за коефіцієнтами концентрації напружень і за геометричною формою;
- власні залишкові напруження;
- температура експлуатації, у ряді випадків перемінна в межах конструкції або в часі;
- середовище і породжувані ним фізичні та хімічні процеси на поверхні;
- потоки елементарних часток випромінювання;
- час експлуатації.

Перелічені вище фактори називаються зовнішніми. Поряд з ними є багато факторів, що визначають реакцію матеріалу на виникаючі стани і протікаючі процеси, тобто ті, котрі характеризують службові властивості матеріалів і елементів. До них відносяться:

- пружність, яка характеризується модулем пружності E і пластична деформація, яка описується залежністю $\sigma = f(\epsilon)$;
- міцність, яка виражається при однократному навантаженні границею текучості, тимчасовим опором, дійсним руйнівним напруженням;
- пластичність у вигляді відносного подовження і звуження;
- зміцненність матеріалу і пластична нестійкість при розтягуванні;
- опір повзучості;
- старіння металу під впливом деформації, температури, часу;
- холодостійкість;
- стійкість проти міжкристалітної корозії й ін.

10.2 Властивості зварних з'єднань

Властивості зварних з'єднань відрізняються від властивостей основного металу, тому що вони формуються під впливом численних факторів. До них відносять вихідний основний метал, зварювальні матеріали, вплив джерел енергії, складні процеси плавлення і кристалізації металу в процесі зварювання, взаємодія його з навколишніми рідкою і газовою фазою, структурні перетворення при дії змінних температур, випадкове виникнення різного роду несутцільностей та ін. Тому властивості зварних з'єднань можуть змінюватися в широких межах. До їх основних особливостей відносять наступні:

- їх більш значне розсіювання в порівнянні з основним металом;
- неоднорідність властивостей і хімічного складу окремих ділянок зварного з'єднання;
- форма з'єднання, яка викликана не тільки умовами утворення, але і можливими дефектами несутцільності, які утворюють у деяких випадках дуже високу концентрацію напружень. Концентрація пластичних деформацій у процесі зварювання і термічний вплив можуть викликати в ряді сталей деформаційне старіння, яке несприятливо позначається на їхній холодостійкості;
- наявність у зварних з'єднань в більшості випадків високих залишкових власних напружень. Залишкові напруження при перемінному навантаженню і низькій пластичності можуть істотно впливати на механічні властивості зварного з'єднання в цілому.

Таким чином, механічні властивості зварних з'єднань залежать від властивостей металу окремих його ділянок, геометричних форм зварного з'єднання, залишкових напружень і ступеня розсіювання кожного із зазначених факторів. Стандартними механічними властивостями зварних з'єднань є: межі міцності та текучості, відносне подовження і звуження, твердість, ударна в'язкість.

Механічні властивості зварних з'єднань – це їхня здатність опірності деформуванню і руйнуванню під впливом зовнішніх і власних механічних сил в умовах концентрації напружень, неоднорідності властивостей і власних напружень.

10.3 Розсіювання механічних властивостей металів, геометричних розмірів елементів, навантажень

Одним з найважливіших факторів, що впливають на несучу здатність конструкції є фактор розсіювання механічних властивостей, геометричних розмірів перетинів і діючих навантажень. Можлива оцінка міцності по вкрай несприятливому сполученню усіх вхідних у розрахунок величин. При невеликій кількості факторів, кожний з яких має невелике розсіювання, можна домогтися задовільного результату. При значному розсіюванні факторів така оцінка дає низький результат. Такі характеристики металу, як σ_T , σ_B , δ , KCU відрізняються від зразка до зразка навіть у межах одного листа металу. Характер виявлених розсіювань наведений на діаграмах (рис. 10.1, 10.2)[12], які побудовані за результатами випробувань великої кількості зразків.

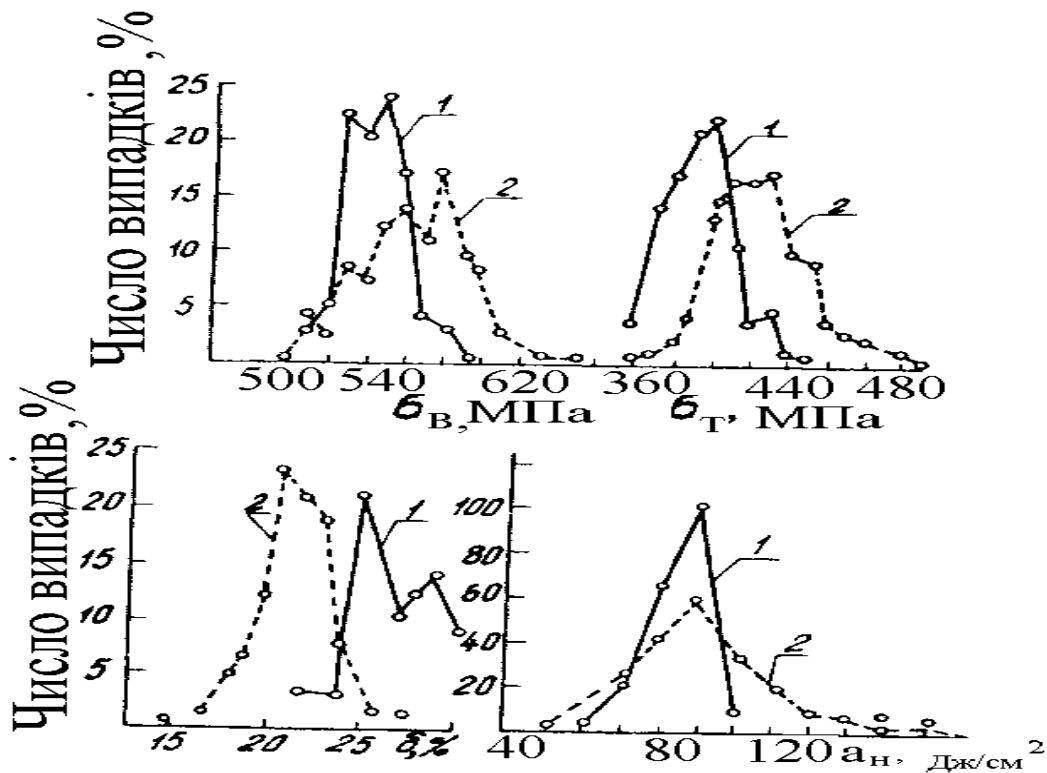


Рисунок 10.1 – Криві розподілу механічних властивостей сталей 10Г2С (1) і 10Г2СД (2)

За вертикаллю відкладається або кількість появ результату m , або частковість m/n – відносна частота появи результату в частках одиниці або у

відсотках; Π – кількість випробуваних зразків. Точки на діаграмах показують появу будь-якого результату в заданому інтервалі зміни величини.

Емпірична діаграма частот називається гістограмою. Середні значення випадкової величини, наприклад для тимчасового опору σ_B позначаються як $\bar{\sigma}_B$ і обчислюються за відповідною формулою.

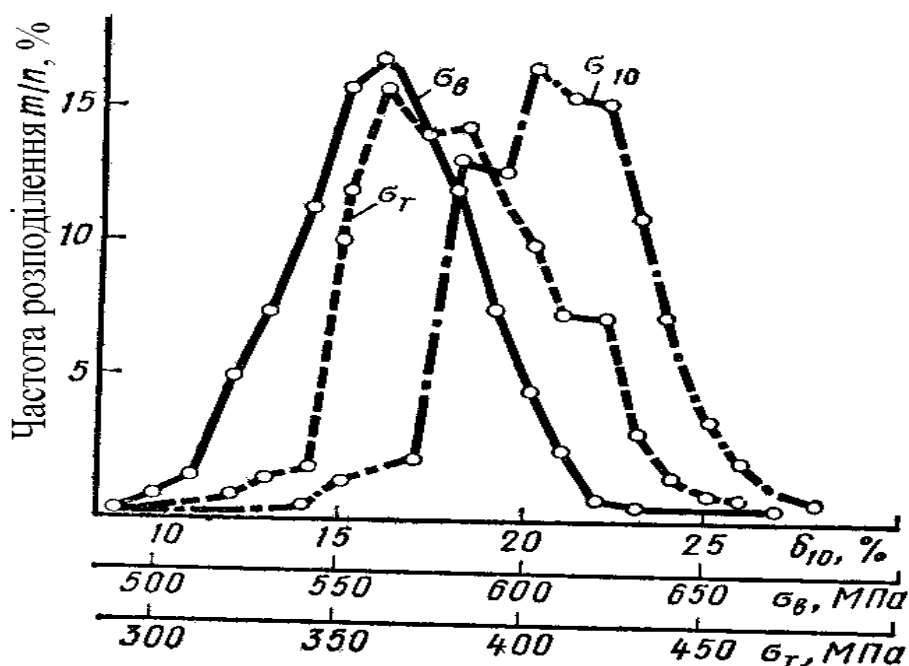


Рисунок 10.2 – Криві розподілу механічних властивостей сталі 15XCHD (кількість випадків $n = 1358$)

Наприклад [12], для :

$$\bar{\sigma}_e = \sum_{i=1}^{i=k} \sigma_{e_i} \frac{m_i}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=k} \sigma_{e_i} m_i = \sum_{i=1}^{i=k} \sigma_{e_i} P_i, \quad (10.1)$$

де $P_i = \frac{m_i}{n}$ частковість. За кількісну характеристику розподілу випадкових величин використовують також дисперсію D і середнє квадратичне відхилення S :

$$D = \sum_{i=1}^{i=k} (\sigma_{e_i} - \bar{\sigma}_e)^2 P_i; \quad (10.2)$$

$$S = \sqrt{D} . \quad (10.3)$$

При аналізі міцності зварних конструкцій розглядаються 3 групи факторів: 1) механічні властивості матеріалів; 2) геометричні розміри елементів перетинів, концентраторів напружень; 3) рівень діючих навантажень або напружень.

Якщо міцності основного металу і зварного з'єднання мають розсіювання (рис.10.3)) [19], то оцінка нерівноміцності зварного з'єднання щодо основного металу $\eta = \sigma'_{B} / \sigma_B \leq 1$ не враховує величини розсіювання.

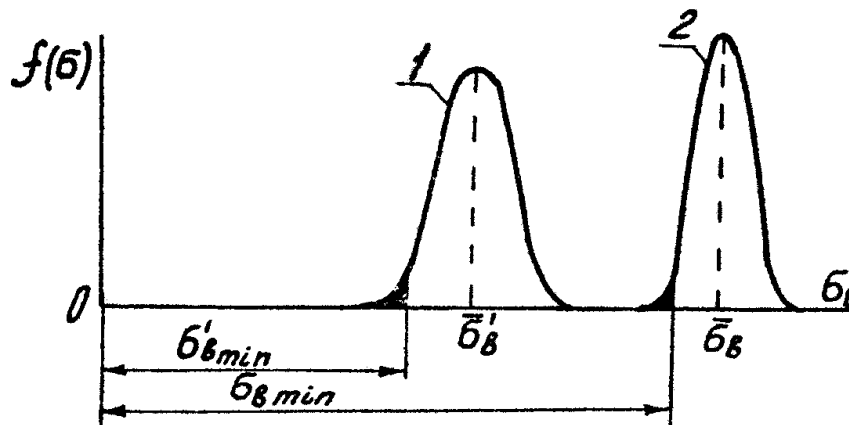


Рисунок 10.3 – Криві розсіювання тимчасового опору зварного з'єднання (1) і основного металу (2)

При припущенні рівної імовірності руйнування (рівність зарисованих площин) нерівноміцність зварного з'єднання відносно основного металу оцінюється відношенням

$$\eta = \sigma'_{B \min} / \sigma_{B \min} , \quad (10.4)$$

де $\sigma'_{B \min}$ – тимчасовий опір зварного з'єднання;

$\sigma_{B \min}$ – тимчасовий опір основного металу.

Міцність елемента визначається властивостями металу і перетином елемента. Для з'єднання устик величина сили:

$$P = \sigma_B F , \quad (10.5)$$

де σ_B – межа міцності,

F – площа перетину елемента, яка має своє розсіювання.

Розглянемо зміну P у залежності від зміни F . Якщо брати середні значення сили $\bar{P} = \bar{\sigma}_B \bar{F}$, то виявиться, що розсіювання величин σ_B і F не буде впливати на імовірність руйнування. Однак дисперсія:

$$D_Z = D_X D_Y + \bar{x}^2 D_Y + \bar{y}^2 D_X \quad (10.6)$$

впливає на імовірність руйнування при незмінному рівні експлуатаційного навантаження.

Розглянемо приклад зміни середнього квадратичного відхилення величини сили P у випадку, якщо $\bar{F}$ і $\bar{\sigma}$ мають рівні коефіцієнти варіації.

Нехай $\bar{\sigma}_y = \bar{x} = 500 \text{ МПа}$, $\bar{F} = \bar{y} = 100 \text{ мм}^2$; $S_X = 50$; $S_Y = 10$.

Тоді коефіцієнти варіації:

$$V_x = V_y = \frac{S_x}{x} = \frac{S_y}{y} = \frac{50}{500} = \frac{10}{100} = 0,1$$

Відповідно дисперсії будуть дорівнювати:

$$D_x = S_x^2 = 2500; \quad D_y = S_y^2 = 100.$$

Величину дисперсії D_Z сили P знайдемо за формулою

$$D_Z = D_X D_Y + \bar{x}^2 D_Y + \bar{y}^2 D_X = 2500 \times 100 + 500^2 \times 100 + 100^2 \times 2500 = 25,5 \times 10^6 \text{ Н}.$$

Середнє квадратичне відхилення S_Z сили P дорівнює:

$$S_Z = \sqrt{D_Z} = \sqrt{25,5 \times 10^6} = 5,05 \times 10^3 \text{ Н};$$

$$\bar{P} = \bar{Z} = 500 \times 100 = 5 \times 10^4 \text{ Н}$$

Визначимо коефіцієнт варіації V_Z сили P :

$$V_z = \frac{S_z}{Z} = \frac{5,05 \times 10^3}{50000} = 0,101.$$

Це показує, що коефіцієнт варіації зростає, тобто, зростає розсіювання. Закон розподілу величини P залежить від законів розподілу σ і F . Пло-

щі поперечних перерізів не можуть настільки змінюватися, щоб істотно впливати на рівень можливого руйнування. Однак коефіцієнт концентрації напружень α може проявляти сильний вплив на міцність. При малих значеннях α концентратори не впливають на міцність, але, починаючи з визначеного рівня, знижують її за нелінійною залежністю (рис.10.4) [19], а сила визначається за формулою

$$P = \sigma_B F / \alpha \quad (10.7)$$

Максимальні навантаження $P_{\max}$ не залишаються постійними, а можуть змінюватися в деяких межах. Відношення середнього руйнівного навантаження до максимального $P_{\max}$ є коефіцієнт запасу руйнівного навантаження.

Імовірні методи в розрахунках на міцність знаходять усе більше застосування для оцінки надійності деталей і конструкцій.

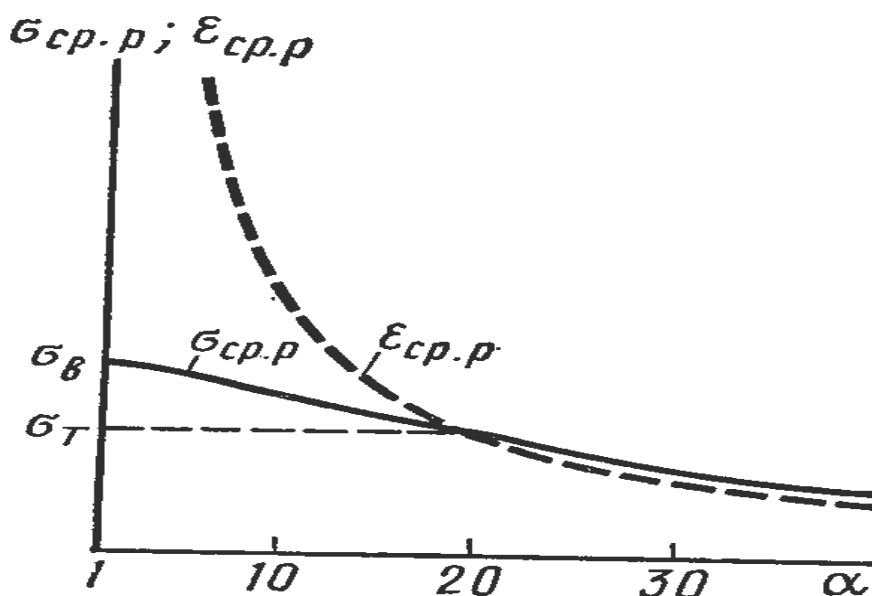


Рисунок 10.4 – Схематична залежність середнього руйнівного напруження $\sigma_{ср.р}$ і середньої руйнівної деформації $\epsilon_{ср.р}$ від коефіцієнта концентрації напружень α

10.4 Конструкційна і розрахункова міцність, причини їхньої розбіжності

Конструкційна міцність – це встановлена в результаті експлуатації або випробувань при конкретних властивостях матеріалу, значенні та характері дії навантажень, температури, середовища, а також технології виготовлення, здатність конструкції опиратися настанню тих граничних станів, від яких залежать її службові властивості.

Розрахункова міцність – це встановлена в результаті розрахунку шляхом використання експериментальних характеристик матеріалу й апарату теорії, яка зв'язує ці характеристики з шуканою величиною міцності, здатність зварного з'єднання або конструкції опиратися настанню тих граничних станів, що відповідають настанню відмовлення в роботі. Розрахункові методи безперервно удосконалюються, але вони не досягають тієї степені удосконалення, яка дозволяє отримати повний збіг розрахункової і конструкційної міцності. У роботі [19] наводяться шість причин розбіжності розрахункової і конструкційної міцності.

Конструкційна міцність є величиною, що має розсіювання, тому що мають розсіювання властивості матеріалу і розміри. Рівень розсіювання різних видів міцності може мати різні значення. Наприклад, якщо ведеться оцінка міцності за граничним станом текучості стінки посудини, що працює під тиском, то розсіювання буде залежати від розсіювання властивостей металу за межею текучості σ_T і товщині листового металу. Це розсіювання звичайно невелике. При оцінці міцності за граничним станом руйнування посудини, яка виготовлена з високоміцної і чутливої до концентрації напружень сталі, то розсіювання буде залежати від концентрації напружень, яка у свою чергу залежить від радіусів закруглень у зонах концентрації. Розсіювання в даному випадку виявиться більш значним. Порівняння по довговічності під час випробування посудин при змінному тиску, дасть ще більше розсіювання результатів. Тому одному отриманому розрахунковому рівню міцності буде завжди відповідати деяка сукупність неоднакових значень конструкційної міцності, що спостерігається фактично. Це одна з причин розбіжності розрахункової і конструкційної міцності, яка впливає із самого принципу побудови розрахунку, тому що не розглядає розсіювання факторів, що беруть участь у розрахунку.

Друга причина. Значний вплив на розбіжність рівнів розрахункової і конструкційної міцності робить імовірний характер появи і розподілення

дефектів у зварних конструкціях, який важко заделегіть урахувати як фактор, що підлягає обліку на стадії проектування. Технологічні вимоги до зварних конструкцій звичайно такі, що не допускають наявності в них небезпечних дефектів. Однак, навіть при 100% контролі якості неруйнуючими методами, зберігається деяка імовірність пропуску дефекту, то залишається й імовірність відхилення розрахункової міцності від конструкційної. Проблема впливу дефектів на міцність найбільш гостра при використанні високоміцних конструкційних матеріалів, які з однієї сторони сприймають високі напруження, а з іншого боку – у край чуттєві до концентрації напружень. Ці матеріали в край чуттєві до таких концентраторів, розміри яких близькі до можливостей фізичних методів контролю.

Третя причина. Недостатність значень комплексного впливу декількох одночасно діючих факторів. Велика частина розрахункових методів розроблена для визначення впливу якого-небудь одного фактора. Облік у розрахунках кожного фактора окремо є недостатнім, що і призводить до розбіжності розрахункової і конструкційної міцності. З'єднання в одному методі розрахунку двох і більш факторів при взаємодії між собою – задача виняткова при сучасному рівні розвитку науки про міцність.

Четверта причина. Недостатність обліку впливу слабо вивчених факторів також є однією з причин розбіжності розрахункової і конструкційної міцності. Наприклад, неврахування низьких температур, які істотно впливають на чутливість матеріалу до концентрації напружень. Методи розрахунку, що враховують цей вплив тільки створюються, а руйнування конструкцій при низьких температурах досить часті.

П'ята причина. Неправильний вибір граничних станів і критеріїв для оцінки міцності конструкцій. Наприклад, розповсюджений розрахунок зварної конструкції за граничним станом текучості, тоді як вона має бути розрахована на витривалість за граничним станом руйнування від втоми або на опірність руйнуванню через концентрацію напружень. Багато помилок і при виборі критеріїв. Наприклад, за критерій роботоздатності використовують ударну в'язкість металу. Однак розбіжність коефіцієнта концентрації напружень у лабораторному зразку (10x10x55 мм) із самою конструкцією не дозволяє переносити ці результати на оцінку виробу. Іноді для оцінки несучої здатності використовуються тільки силові критерії замість комбінації їх з деформаційними, котрі на відміну від силових однаково добре чуттєві до зміни коефіцієнта концентрації напружень α у всьому діапазоні його змін; у той час, як силові критерії добре реагують на зміну α поки середнє руйнів-

не напруження $\sigma_{\text{ср.р}}$ залишається нижче $\sigma_{\text{т}}$ (див.рис. 12.4). Критерій критичного розкриття кінця тріщини перед руйнуванням $\delta_{\text{с}}$ також має перевагу перед силовими критеріями, якщо конструктивні елементи руйнуються після протікання пластичної деформації.

Шоста причина. Імовірна природа формування конструкційної міцності. Тут є два аспекти. Один пов'язаний з комбінацією різних факторів і їхнім несприятливим сполученням, а другий полягає в тому, що кожний з факторів має розсіювання. Статистичний метод використовується рідко і в окремих випадках. У доступному для огляду майбутньому неможливість обліку статистичної природи формування конструкційної міцності буде однією з головних причин розбіжності розрахункової і конструкційної міцності. Розрахункова міцність може збігатися з конструкційною тільки при застосуванні імовірних методів з урахуванням розсіювання діючих факторів.

Імовірні методи у розрахунках на міцність знаходять застосування для оцінки надійності деталей і конструкцій. Надійність – це властивість виробу виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники в заданих межах впродовж потрібного проміжку часу або потрібного напруцювання. Кожна властивість має міру. У галузі міцності такою мірою властивості деталі виконувати задані функції є значення будь-якої характеристики деталі в порівнянні з максимально можливою у експлуатації, тобто у відношенні до конкретної деталі це є фактичний коефіцієнт запасу n . У відношенні до сукупності виробів застосовується поняття імовірності. У цьому випадку надійність – це імовірність виконання заданих функцій окремими виробами при наявності великої кількості однотипних виробів, які утворюють деяку сукупність. Якщо сам виріб являє складну сукупність окремих елементів, кожний із яких може визвати відмову, то надійність у даному випадку – це імовірність виконання системою заданих функцій у визначених умовах впродовж потрібного періоду часу. Стосовно до розрахунків на міцність, коли необхідно, щоб не наступив той чи інший граничний стан під надійністю треба розуміти імовірність ненастання граничних станів, які обмежують нормальну роботу виробу.

10.5 Шляхи зближення розрахункової і конструкційної міцності

Зближення, а в деяких випадках і збіг розрахункової і конструкційної міцності, забезпечується системою різних заходів. У галузі розрахунків це досягається безперервним удосконаленням розрахункових методів.

Якщо розрахункова міцність вище конструкційної, то при невеликих коефіцієнтах запасу не виключені виходи конструкції з ладу через настання граничного стану. Якщо розрахункова міцність нижче конструкційної, то це означає, що допущено перевитрату металу. Для збігу розрахункової і конструкційної міцності необхідно виконання наступних умов:

- правильний вибір граничних станів, за якими виконується визначення міцності;

- у межах кожного з розглянутих граничних станів вибір таких показників, які щонайкраще підходять для кількісного визначення величини міцності;

- застосування такого апарату теорії, який би дозволяв обчислити запас міцності або імовірність руйнування на основі використання найпростіших характеристик металу;

- облік у розрахунках додаткових факторів (факторів умов роботи), що у використовуваному розрахунковому методі не є основними, наприклад, схеми напруженого стану, неоднорідності властивостей металу, дефектів, власних напружень, температури, характеру дії навантажень, середовища, статистичного розсіювання характеристик металу та ін;

- використання коефіцієнтів запасу при правильно обраних розрахункових граничних станах є методом призначення таких умов експлуатації у порівнянні з розрахунковою міцністю, при яких несприятливе розсіювання факторів, не врахованих розрахунком, не понизить конструкційну міцність виробу до рівня відповідного експлуатаційним умовам;

- при застосуванні імовірних методів розрахунку обходяться без коефіцієнтів запасу, а оперують припустимою імовірністю руйнування. Тільки у цьому випадку при правильно врахованих факторах можливий збіг розрахункової і конструкційної міцності.

На стадії проектування крім виконання низки задач, пов'язаних зі службовим призначенням конструкції, прагнуть приймати такі рішення, які б по можливості виключали дію неясних у розрахунковому і фізичному плані факторів (наприклад, назначають такі форми конструкції, що дозволяють визначити в них напруження; опробувані матеріали і т.ін). Якщо метал чуттєвий до концентрації напружень, необхідно враховувати тріщину, еквівалентну дефекту, який може бути виявлений. При розробці технології зварювання необхідно прагнути до усунення факторів, які важко врахувати розрахунком (наприклад, термічна обробка усуває неоднорідність механічних властивостей, знімає залишкові напруження; виправленням усуваються недосконалості геометричної форми, які можуть визвати концентрацію напружень і які не передбачені розрахунком).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 ГОСТ 9.903-81. Стали и сплавы высокопрочные. Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание.— М.: Изд-во стандартов, 1981. — 21с.
- 2 ГОСТ 25506-85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 62с.
- 3 ГОСТ 26294-84. Соединения сварные. Методы испытаний на коррозионное растрескивание // Сварочное производство.— 1985. — №7.— с.11-12.
- 4 Механические свойства металлов: Учебник / В.С. Золотаревский.— М.: Металлургия, 1983. — 350 с.
- 5 Опір матеріалів: Підручник / Г.С. Писаренко, О.Л.Квітка, Є.С.Уманський; За ред. Г.С.Писаренка. — 2-ге вид., допов. і переробл. — Київ.: Вища шк., 2004. — 655с.
- 6 Основы теории упругости и пластичности: Учебник для строительных спец. вузов / А.В.Александров, В.Д. Потапов. — М.: Высшая школа, 1990 . — 400с.
- 7 Сопротивление материалов : Учебник для вузов / А.В.Александров, В.Д.Потапов, Б.П.Державин. — М.: Высшая школа, 2001. — 560с.
- 8 Брок Д. Основы механики разрушения. — М.: Высшая школа. 1980.— 368с.
- 9 Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В.А. Винокуров, С.А.Куркин., Г.А.Николаев; Под ред. Б.Е.Патона. — М.: Машиностроение, 1996. — 576 с.
- 10 Теория сварочных деформаций и напряжений/ В.А.Винокуров, А.Г.Григорьянц. — М.: Машиностроение, 1984. — 284 с.
- 11 Винокуров В.А.. Специальные главы прочности сварных конструкций. — М.: МВТУ, 1973. — 110с.
- 12 Иванова В.С. Разрушение металлов.— М.: Металлургия, 1979.— 167с.
- 13 Качанов Л.М. Основы механики разрушения.— М.: Наука, 1974.— 312с.
- 14 Качанов Л.М. Основы теории пластичности.— М: Наука. 1969. — 420с.
- 15 Качанов Л.М. Основы механики разрушения. — Киев: Вища школа, 1986. — 775с.
- 16 Куркин С.А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением. — М.: Машиностроение, 1976. — 184с.

- 17 Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучесть. – М.: Машиностроение, 1978. – 400с.
- 18 Деформация и разрушение материалов/ Ф.Макклинток, А.Аргон. – М.: Мир, 1970. – 443с.
- 19 Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций / Г.А.Николаев, С.А.Куркин, В.А.Винокуров. – М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.
- 20 Стеклов О.И. Прочность сварных конструкций в агрессивных средах. – М.: Машиностроение, 1976. – 200 с.
- 21 Херцберг Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. – М.: Металлургия, 1989. – 576с.
- 22 Harrison J. D. Acceptance levels for defects in welds subjected to fatigue loading . Int. Inst. Weld. Annu. Assem - Bratislava, 1979. – P. 237-247.
- 23 Harrison I.D., Dawes M.G., Archer G.L. and Kamath M.S. The COD approach and ITS application to welded structures // Int. Inst. Weld. Assem - Bratislava., 1979. – P.132-148.
- 24 Kanasava T., Machid S. Outline of IWES Standard for critical assessment of defects with regard to brittle fracture and some studies // Int. Inst. Weld. Annu. Assem. Bratislava, 1979. – P. 274-304.
- 25 Чертов І. М. Зварні конструкції. – К.: Арістей, 2006. – 376с.
- 26 Ковтун В.В., Павлов В.С., Дорофеев О. А. Опір матеріалів. Розрахункові роботи. Навчальний посібник. – Львів: Афіша, 2002. – 280с.
- 27 Карпенко В. М., Власов А.Ф. Спеціальні розділи міцності зварних конструкцій: Навч. посібник. – Краматорськ, ДДМА, 2003. – 168с.
- 28 Шимановский А.В. и др. Техническое состояние строительных металлических конструкций в Украине. Автоматическая сварка. - №9.– 2001.- с. 33-38.

